INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ORIGEN DE LOS EUCARIOTAS

DEMOSTRACION DEL TEOREMA DE FERMAT

CHERNOBIL, DIEZ AÑOS DESPUES

TERMES PREHISTORICOS ATRAPADOS EN AMBAR



JUNIO 1996
800 PTAS.



Junio de 1996 Número 237

SECCIONES



Portada: Jackie Beckett

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8-9	Jared Schneidman Design (*dibujo*); Sam Ogden (*fotografía*)
10-11	Sam Ogden (*izquierda*); cortesía de Alex P. Pentland (*derecha*)
13-16	Sam Ogden
18-23	Roberto Osti
24	Dimitry Schidlovsky
25	S. E. Frederick, Universidad de Wisconsin-Madison
28-29	Alfred T. Kamajian
31-34	Michael Goodman
35	Univ. de Arizona, proyecto Oases
46	Grochowiak/Keplicz, *Sygma*
47	Igor Kostin/Mago, *Sygma*
48-49	Vladimir Syomin
50	Igor Kostin/Mago, *Sygma* (*izda.*); Conti/S. Bukowski, *SIPA* (*dcha.*)
51	*SIPA*
54-56	Rosa de Frutos
57	Nuria Paricio
58	Lluís Pascual (*arriba*); Ibo Galindo y Lluís Pascual (*abajo*)
59	Trini Alberola
60	Documentos PLS (*izquierda*); Roger-Viollet (*derecha*)
62	Documentos PLS
66-67	Ed Bridges, Museo Americano de Historia Natural
68-69	Museo Americano de Historia Natural (*arriba*); Denis Finnin, Museo Americano de Historia Natural (*abajo, izda.*); David A. Grimaldi (*abajo, dcha.*)
70	David A. Grimaldi (*arriba*); Jackie Beckett, Museo Americano de Historia Natural (*abajo*)
71	David A. Grimaldi
72	Stephen Doberstein y Michael Delannoy, Univ. Johns Hopkins (*arriba*); (*abajo*) David A. Grimaldi (*dibujos*); Ed Bridges, Museo Americano de Historia Natural (*fotografía*)
73	David A. Grimaldi (*sup. izda. y centro*); William Crepet, Univ. de Cornell (*sup. dcha.*); Jackie Beckett, Museo Americano de Historia Natural (*abajo*)
74-75	IBM (*izda.*); IMM y Xerox (*sup. dcha.*); James Gary (*centro e inferior derecha*)
76-77	Peter Menzel (*arriba izda.*); libros (*de arriba a abajo*): cortesía de Bantam Spectra, Bruce Jensen; cortesía de Bantam Books, Pamela Lee, cortesía de Baen Books, Stephen Hickman; James Aronovsky, Zuma (*abajo dcha.*)
78-79	David Scharf (*de izquierda a derecha*); George Kelvin; Andreas Thess y Pavel Nikolaev; D. Eisenberg y W. Degrado
84	Bryan Christie
85-88	Johnny Johnson
89	Michael Goodman
96	Boston Globe Photo (*foto*); Dee Breger (*micrografía*); Steve Karp

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Salas inteligentes, Fermat, demostrado al fin* y *Juegos matemáticos*; Esteban Santiago: *El origen de las células eucariotas*; Mónica Murphy: *La búsqueda de vida en otros planetas*; Juan Pedro Campos: *Chernóbil, diez años después*; Joandomènec Ros: *Atrapados en ámbar*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Angel Garcimartín: *Perfiles.*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M.Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada 

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El Departamento de Guerra acaba de anunciar la construcción de un robot electrónico, conocido como Eniac (Electronic Numerical Integrator and Computer), capaz de resolver problemas científicos tan complejos, que no podían abordarse por ningún método de resolución hasta ahora disponible. El ingenio está preparado para calcular 1000 veces más deprisa que la máquina calculadora universal más avanzada y resuelve en horas problemas para los que una máquina mecánica necesitaría años. Con sus aproximadamente 18.000 tubos de vacío ocupa una sala de casi 10 × 15 metros.»

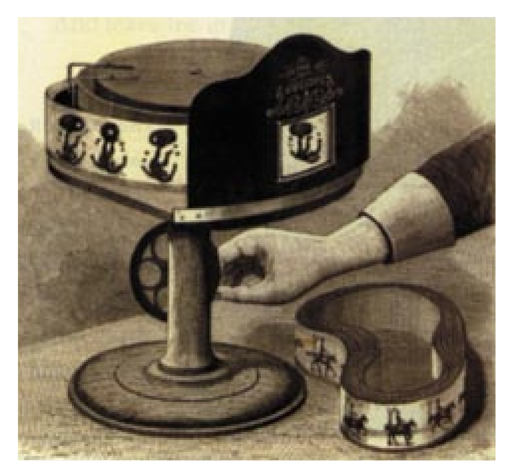
«No caben dudas de que la aviación privada va a expandirse rápidamente en el futuro inmediato y que uno de los campos de crecimiento del uso de aviones pequeños será la industria.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La cuestión del injerto de tejido vivo se ha venido tratando con frivolidad por la prensa inexperta. También hay, por lo menos, una novela que la toma por centro de la narración. El señor H. G. Wells ha basado el argumento de su reciente *La isla del doctor Moreau* en la producción artificial de seres semihumanos a partir de animales. El doctor Moreau es un feroz vivisector, con toques de hipnotizador, y ha fabricado un muestrario de criaturas insólitas: hombres-buey-cerdo y una mujer-puma-perro quien escapa sin estar acabada, para la subsiguiente destrucción de su artífice. La narración es horripilante y apasionante en grado sumo. Sin embargo, las investigaciones recientes acerca de los trasplantes y las transfusiones se muestran tajantes en su rechazo de las operaciones realizadas entre animales de especies diferentes. Tan extrema es la aversión de un organismo a la materia ajena, que los trasplantes de tejidos procedentes incluso de individuos de la misma especie rara vez aguantan. Se reciben como cuerpos extraños.»

«En los siete años transcurridos de 1888 a 1894 murieron 16.000 ferroviarios y 170.000 quedaron lisiados. Tan tremenda estadística de muertos y heridos parece increíble; la historia nos habla de pocas batallas que provocaran tamaña calamidad. Un gran porcentaje de esas muertes se debió al uso de maquinaria defectuosa por parte de las compañías ferroviarias; hace veinte años que se demostró el enganche automático de coches y vagones, sin que hiciera falta en adelante que un empleado arriesgara su vida introduciéndose entre dos unidades a engarzar. Como respuesta a las peticiones de múltiples procedencias, el Congreso de los Estados Unidos aprobó en marzo de 1893 la Ley de Dispositivos de Seguridad Personal. Esta le ha costado o les costará a los ferrocarriles cincuenta millones de dólares para cumplir la reglamentación. Ya se ha progresado tanto que la tasa de muertos ha descendido un 35 por ciento.»

«El cristalino del ojo, al igual que el objetivo de una cámara, invierte la imagen de un objeto al formarla sobre la retina. Pero los psicólogos aún tienen que explicar en detalle por qué las cosas las vemos boca arriba, aunque se cree que la reinversión se efectúa mentalmente y que la determinan y controlan las sensaciones táctiles. Ultimamente se ha señalado que numerosos niños de poca edad dibujan los objetos boca abajo. No obstante, si a un niño que dibuja las cosas boca abajo, cuando lo hace sobre una mesa horizontal, se le pide que dibuje en un pizarra colocada verticalmente, entonces realizará todos los dibujos correctamente hacia arriba.»


El viviscopio: ingenioso y divertido

«Se dedica no poca cantidad de ingenio a la producción de artefactos de diversión, pero muy pocas veces podemos ofrecer a nuestros lectores uno que sea más interesante, desde el punto de vista científico y lúdico, como el que aquí ilustramos. El viviscopio está surtido con un número de tiras sinfín de papel con dibujos en color de figuras en momentos sucesivos de movimiento. Se consigue así un efecto zootrópico perfecto y las figuras parecen adquirir vida.»

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Tras una travesía de 20 días desde Liverpool, arribó a Nueva York el vapor gigante *Great Britain*. Se le han remodelado las hélices, pero no parece que su velocidad haya mejorado. Resulta asombroso que los armadores ingleses persistan en mantenerse tan absolutamente ignorantes de los más evidentes principios naturales de la mecánica, hasta el punto de suponer que una hélice de cualquier forma basada en el principio del tornillo puede competir con la sencilla rueda de paletas de Fulton.» [*Nota de la redacción: La rueda de paletas, teóricamente eficiente pero difícil de controlar y proclive a las averías en aguas agitadas, está hoy relegada a las tranquilas aguas interiores.*]

«Entre los inventos más lujosos recientemente presentados se encuentra una elegante colmena de salón, invención del señor J. A. Cutting, de Boston. Acabada a modo de una vitrina de estilo elegante, y del tamaño de una cómoda, su frente está provisto de puertas de vidrio a través de las cuales puede observarse la actividad de las "industriosas abejas". Mientras tanto, las abejas, no intimidadas por la contigüidad de una sociedad igualmente civil aunque menos industriosa, prosiguen sus ocupaciones confiadamente al disponer de una entrada privada a través de los muros de la casa.»

Salas inteligentes

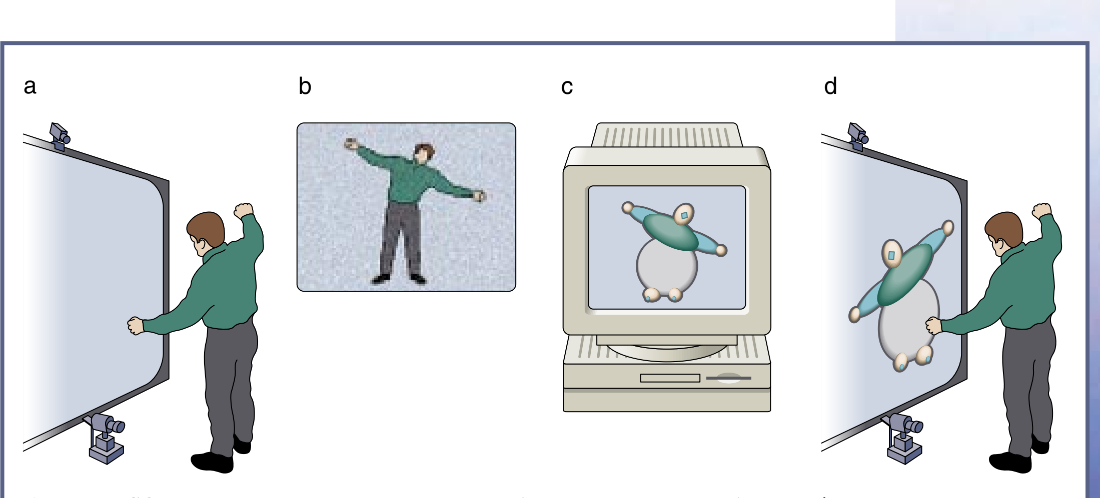
Al crear sistemas informáticos capaces de identificar a las personas e interpretar sus acciones, la investigación ha dado un paso más hacia la creación de ambientes prestos a servirnos

Alex P. Pentland

Imagine una casa que siempre sabe dónde están los niños, capaz de avisarnos si están haciendo algo malo. O un despacho consciente de que estamos celebrando una reunión importante y nos protege de interrupciones. O un automóvil que advierte nuestro cansancio y nos indica la necesidad de detenernos en el arcén. Pues bien, hace mucho que los científicos tratan de diseñar sistemas informáticos capaces de semejantes proezas. A pesar de sus esfuerzos, las máquinas modernas siguen sin poder equipararse a las secretarias o a las "canguros". Pero tal vez lo consigan.

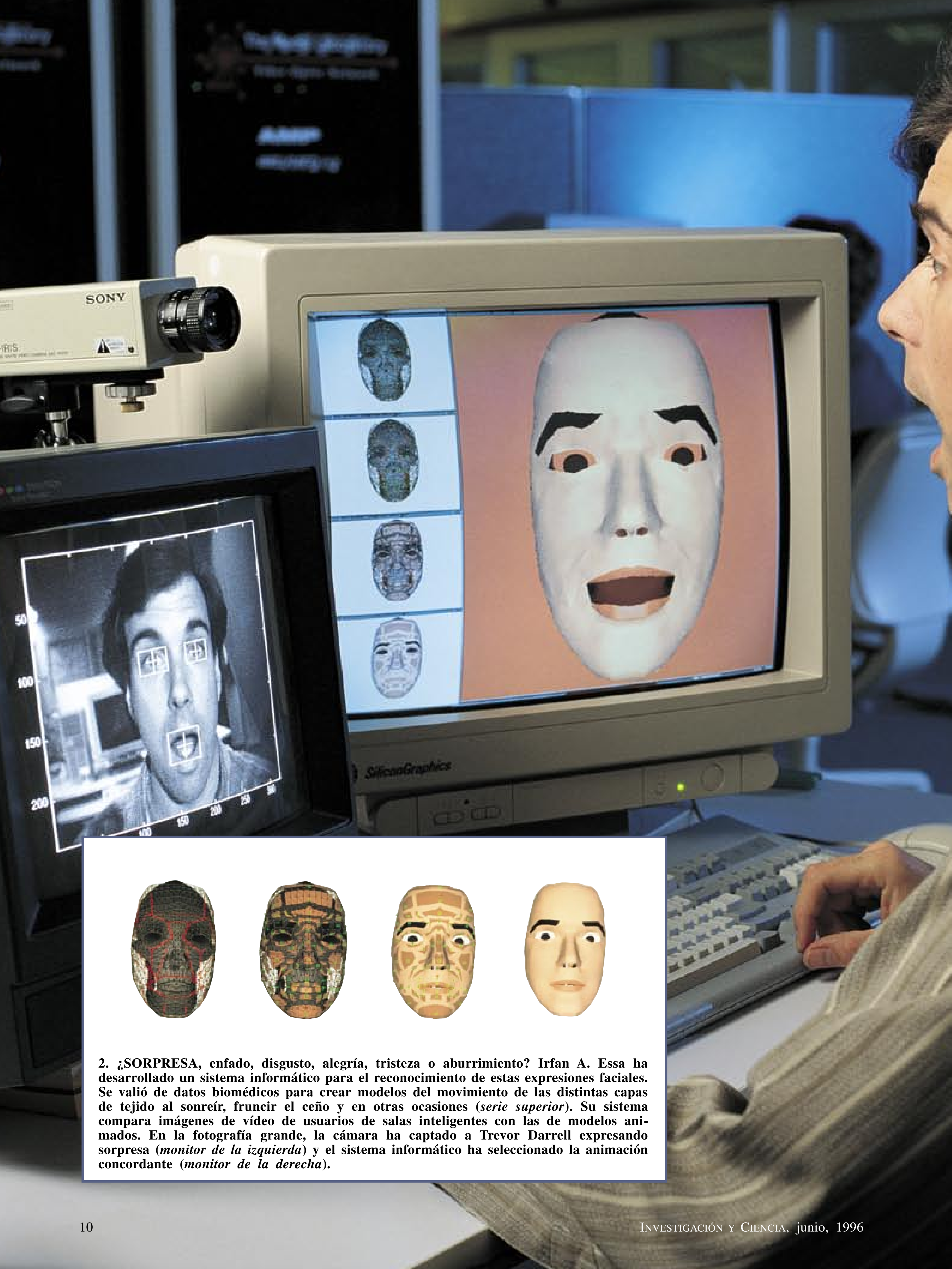
El problema, en mi opinión, estriba en que los ordenadores actuales son sordos y ciegos: perciben el mundo sólo a través de un teclado o de un ratón. Incluso los equipos multimedios, que además de texto manejan señales audiovisuales, se limitan a transportar ristras de datos, sin entender el significado implícito en los caracteres, sonidos e imágenes que nos aportan. Estoy convencido de que los ordenadores deberán poder oír y ver antes de que demuestren su verdadera utilidad. Más aún, han de ser capaces de reconocer quiénes somos; de modo similar al de una persona, o incluso al de un perro, han de percatarse de lo que estamos pensando.

A tal fin, mi grupo de trabajo del laboratorio de medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) ha desarrollado hace poco una familia de sistemas computarizados para el reconocimiento de rostros, expresiones y gestos. Esta técnica nos ha permitido construir ambientes



1. PERVISOR es un programa capaz de seguir a una persona mientras ésta se mueve por una sala inteligente. Una cámara registra sus movimientos (*a*) y transmite esa información al sistema informático (*b*). Pervisor crea entonces un modelo de la persona, que simboliza mediante globos (*c*). Cada globo representa el color promedio y la posición de la cabeza, la camisa, los pantalones, las manos y los pies. Pervisor proyecta después el modelo en un mundo virtual, al objeto de que personajes imaginarios puedan interactuar con el usuario de la sala inteligente (*d*). Por ejemplo, si Christopher R. Wren, del laboratorio de medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts, a quien vemos a la derecha, ofreciera la mano, su "michelín" haría otro tanto. Silas, el perro virtual, le ofrecería la pata.





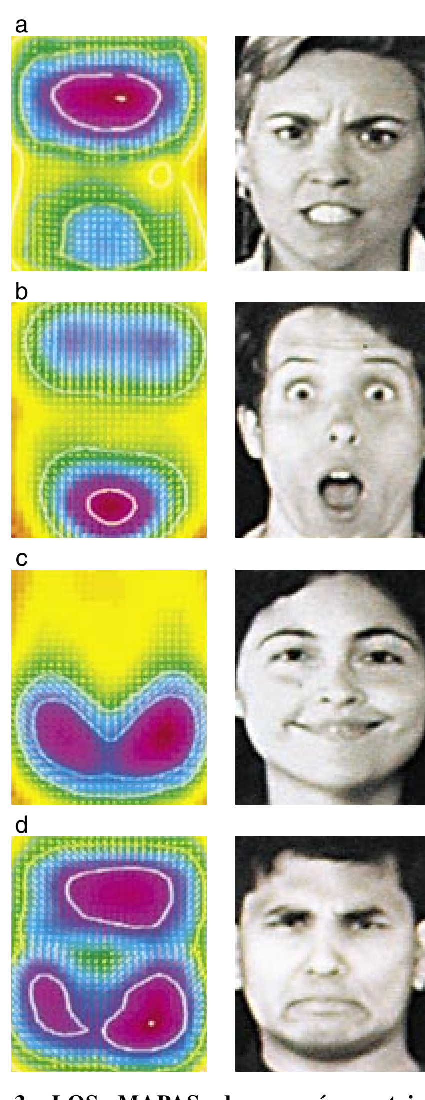
2. ¿SORPRESA, enfado, disgusto, alegría, tristeza o aburrimiento? Irfan A. Essa ha desarrollado un sistema informático para el reconocimiento de estas expresiones faciales. Se valió de datos biomédicos para crear modelos del movimiento de las distintas capas de tejido al sonreír, fruncir el ceño y en otras ocasiones (*serie superior*). Su sistema compara imágenes de vídeo de usuarios de salas inteligentes con las de modelos animados. En la fotografía grande, la cámara ha captado a Trevor Darrell expresando sorpresa (*monitor de la izquierda*) y el sistema informático ha seleccionado la animación concordante (*monitor de la derecha*).

cuyo comportamiento se asemeja al del hogar, la oficina o el automóvil anteriormente descritos. Se trata, así hemos denominado a tales entornos, de las salas inteligentes. Están dotadas de cámaras y micrófonos que trasladan sus registros a una red de ordenadores cercana. Los ordenadores evalúan lo que están haciendo y diciendo las personas que se hallan en la estancia. Merced a tal conexión, los visitantes pueden servirse de sus voces y expresiones —en lugar de teclados, sensores o gafas— para controlar programas informáticos, inspeccionar informaciones multimedios o aventurarse por dominios de realidad virtual.

La noción clave consiste en lo siguiente: puesto que la sala inteligente sabe algo de las personas que la ocupan, puede reaccionar inteligentemente ante ellas. Trevor Darrell y Bruce M. Blumberg, alumnos de posgrado, trabajando en colaboración con Pattie Maes y con el autor, construyeron en 1991 la primera sala inteligente del MIT. Su iniciativa fructificó pronto en un experimento de tipo colaborativo; en la actualidad participan en él cinco salas repartidas por el mundo e interconectadas entre sí por líneas telefónicas: tres en Boston, una en Japón y otra en el Reino Unido. (Hay previstas también instalaciones en París, Nueva York y Dallas.)

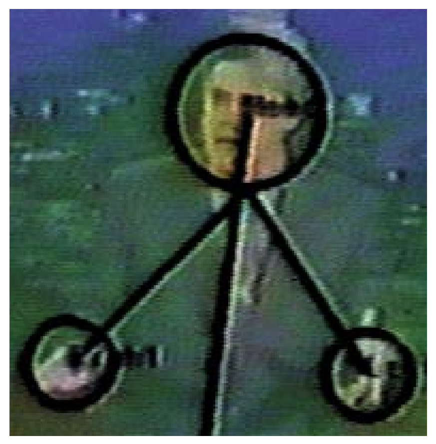
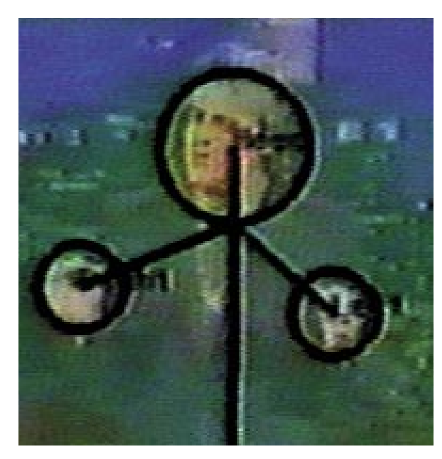
Cada sala contiene varias máquinas, ninguna de las cuales supera la potencia de un ordenador personal. Estas unidades afrontan diferentes problemas. Por ejemplo, si una sala inteligente ha de analizar imágenes, sonidos y gestos, la equipamos con tres ordenadores, uno para cada tipo de interpretación. Si se requieren mayores capacidades, añadimos más máquinas. Aunque los módulos se encargan de diferentes tareas, todos ellos se fundan en un mismo método estadístico, conocido por análisis de máxima verosimilitud: los ordenadores comparan la información entrante con modelos que tienen almacenados en la memoria. Calculan la probabilidad de que cada modelo almacenado pueda describir la entrada observada y, en última instancia, seleccionar el de máximo ajuste. Efectuando tales comparaciones, las máquinas de nuestra sala inteligente pueden responder a un abanico de preguntas concernientes a sus usuarios, entre ellas, quiénes son y a veces, incluso, qué es lo que quieren.

Antes de que una sala inteligente pueda empezar a averiguar lo que sus ocupantes están haciendo, necesita



3. LOS MAPAS de energía motriz muestran en colores cálidos las zonas faciales que más se han movido. Ciertas expresiones producen figuras coloreadas típicas. Por ejemplo, cuando una persona manifiesta enfado, la mayoría de las contorsiones faciales se producen alrededor del ceño (*a*). En el gesto de sorpresa siempre intervienen las cejas y la boca (*b*). La felicidad se expresa sobre todo con la boca (*c*). El disgusto aparece en todo el rostro.

localizarlos. Por tal motivo, los posgraduados Christopher R. Wren y Ali Azarbayejani, juntamente con Darrell y el autor, desarrollaron un sistema llamado Person Finder (un "visor de personas", que aquí denominaremos "Pervisor") capaz de seguirle la pista a una persona cuando ésta se mueve por la estancia. Al igual que nuestros restantes sistemas, Pervisor adopta el método de máxima verosimilitud. Para empezar, modeliza a la persona recogida por la cámara mediante un conjunto conexo de figuras globulares —dos para las manos, dos para los pies y uno para la cabeza, la camisa y los pantalones, respectiva-

4. EL DETECTOR DE CHISTES recoge las frases cómicas del humorista Jay Leno. El sistema informático sigue los cambios de tiempo, voz y gesto del artista. Han intervenido en su desarrollo Joshua Wachman, Michael Casey, Alan Wexelblat, Essa, Rosalind W. Picard, Justine Cassell y quien firma este artículo.

y brillo del píxel de los valores medios de color y brillo del globo. Compara el resultado con la distribución de cada globo para determinar la probabilidad de que la diferencia se deba al azar. Si, por ejemplo, la diferencia de brillo entre un píxel y un globo fuese del 10 por ciento, y las estadísticas del globo dijeran que tal diferencia solamente se da en un 1 % de las veces, la probabilidad de que el píxel perteneciera al globo sería de un mero uno por ciento. Las sombras plantean algún problema, porque provocan cambios de luminancia que nada tienen que ver con la probabilidad de que cierto píxel pertenezca a cierto globo. Por esta razón, Pervisor explora las sombras, que corresponden a zonas más oscuras de lo esperado, e iguala su color y saturación valiéndose del brillo general de la zona.

Pervisor ha de vencer también pequeñas diferencias en la iluminación o disposición de los objetos de la sala, diferencias que podrían inducir al programa a situar ciertos píxeles en modelos erróneos. Para evitar esta dificultad, el sistema actualiza incesantemente los píxeles visibles por detrás del usuario, promediando la antigua información de color con la nueva. De esta forma le sigue la pista a los cambios que se producen, por ejemplo, cuando el usuario mueve un libro, alterando así la escena en dos lugares: allí donde estaba el libro y allí donde ahora está. Una vez realizados tales cálculos y compensaciones, Pervisor asigna cada píxel de la nueva imagen al modelo que con mayor verosimilitud lo contiene. Por último, actualiza los datos estadísticos describiendo el modelo globular y la escena de fondo, así como todos los datos que pronostican de qué forma se desplazará el modelo.

Además de saber dónde se encuentran las personas, una sala inteligente debe saber también quiénes son y qué están diciendo. Muchos investigadores han inventado algoritmos que permiten a los ordenadores comprender el habla. Esos sistemas sólo suelen trabajar bien cuando el usuario lleva puesto un micrófono o se sienta cerca de uno. Una sala inteligente que se limitara a interpretar nuestras acciones cuando permaneciéramos en un lugar concreto no parecería demasiado inteligente. Así pues, entre los posgraduados Sumit Basu y Michael Casey y el autor se buscó otra solución, que permitiese al ordenador descodificar el habla del usuario cuando éste se mueve con libertad por una sala, aun cuando la estancia sea francamente ruidosa.

Nuestro producto final se funda en el control que Pervisor lleva en todo momento de la posición del usuario. Valiéndose de esta información, el sistema de reconocimiento del habla "guía" electrónicamente una serie de micrófonos fijos, encargándose de que sólo se realcen los sonidos provenientes de la dirección de la boca del usuario. Es tarea fácil. Dado que el sonido viaja a velocidad constante, llega en momentos ligeramente distintos a los diferentes lugares. Así pues, cada una de las fuentes sonoras produce un patrón característico de demoras temporales. Por tanto, si el sistema toma las salidas de una instalación fija de micrófonos y las suma a las demoras temporales que caracterizan a cierto punto, puede reforzar el sonido procedente de tal ubicación. Después sólo hace falta comparar ese sonido con los de palabras conocidas, hasta encontrar una coincidencia.

Una sala inteligente debe saber también quién está hablando en su interior o qué le están diciendo a ella. Para actuar con visos de inteligencia, resulta esencial que el sistema conozca la identidad de sus usuarios. Con frecuencia importa tanto quién está dando una orden como la orden propiamente dicha. La forma más rápida de identificar a una persona podría muy bien ser reconocer su rostro. Hemos desarrollado, por consiguiente, un sistema para que nuestras salas hagan precisamente eso. Para aplicar el método de máxima verosimilitud, este sistema necesitaba construir antes modelos de todos los rostros que "conocía". Trabajando con los posgraduados Matthew A. Turk y Babback Moghaddam, ambos del MIT, descubrimos que era importante atender a los rasgos faciales que mejor describieran todo un conjunto

ALEX P. PENTLAND se doctoró en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1982. Encontró su primer trabajo en el Centro de Inteligencia Artificial de SRI. En 1983 fue nombrado "profesor industrial" en el departamento de ciencias de cómputo de la Universidad de Stanford, donde tres años después ganó un premio a la excelencia docente. Volvió al MIT en 1987, donde ahora dirige la sección de computación perceptiva del laboratorio de medios. El grupo consta de más de 50 investigadores, que estudian la visión, la música y el grafismo por ordenador, además del habla y las interacciones entre humanos y máquinas. La investigación de Pentland sobre salas inteligentes ha contado con la subvención de British Telecom, Texas Instruments, Nissan CBR y varios entes gubernamentales de los Estados Unidos.

Ropas inteligentes

El comportamiento de una sala inteligente recuerda un poco al de un mayordomo diligente. Evita resultar un estorbo y busca sin cesar la ocasión de ser útil. A veces, empero, queremos algo más parecido a un ayudante personal que viaje con nosotros y prevea nuestras necesidades. La forma de lograr tal ayudante consiste en integrar las cámaras, micrófonos y ordenadores de una sala inteligente en la propia indumentaria.

Las prendas inteligentes pueden proporcionar información particularizada relativa a nuestro ambiente, por ejemplo, los nombres de las personas con quienes nos encontramos o instrucciones para nuestra próxima reunión. Y tales prendas pueden reemplazar a casi todos los ordenadores y aparatos de electrónica de consumo. Al igual que en el caso de la sala inteligente, la idea clave es que, dado que nuestra indumentaria “conoce” nuestro medio, puede reaccionar inteligentemente para sernos útil.

El proyecto de ropas inteligentes del MIT fue iniciado en 1992 por Thad Starner y Steve Mann; cuenta con el respaldo de Rosalind W. Picard y el autor. Al integrar ordenadores, cámaras, micrófonos y otros sensores en las ropas de una persona, la visión que tiene el ordenador pasa de ser pasiva, en tercera persona, como en la sala inteligente, a ser activa y privilegiada, en primera persona. Por esta razón, las ropas inteligentes pueden participar más íntimamente en las actividades del usuario, tornándose así en ayudantes personales (digitales) potencialmente inteligentes.

Por ejemplo, instalando una cámara en la montura de unas gafas, nuestros programas de reconocimiento de rostros podrían facilitarnos el nombre de la persona a la que estamos mirando, susurrándonos su nombre al oído.

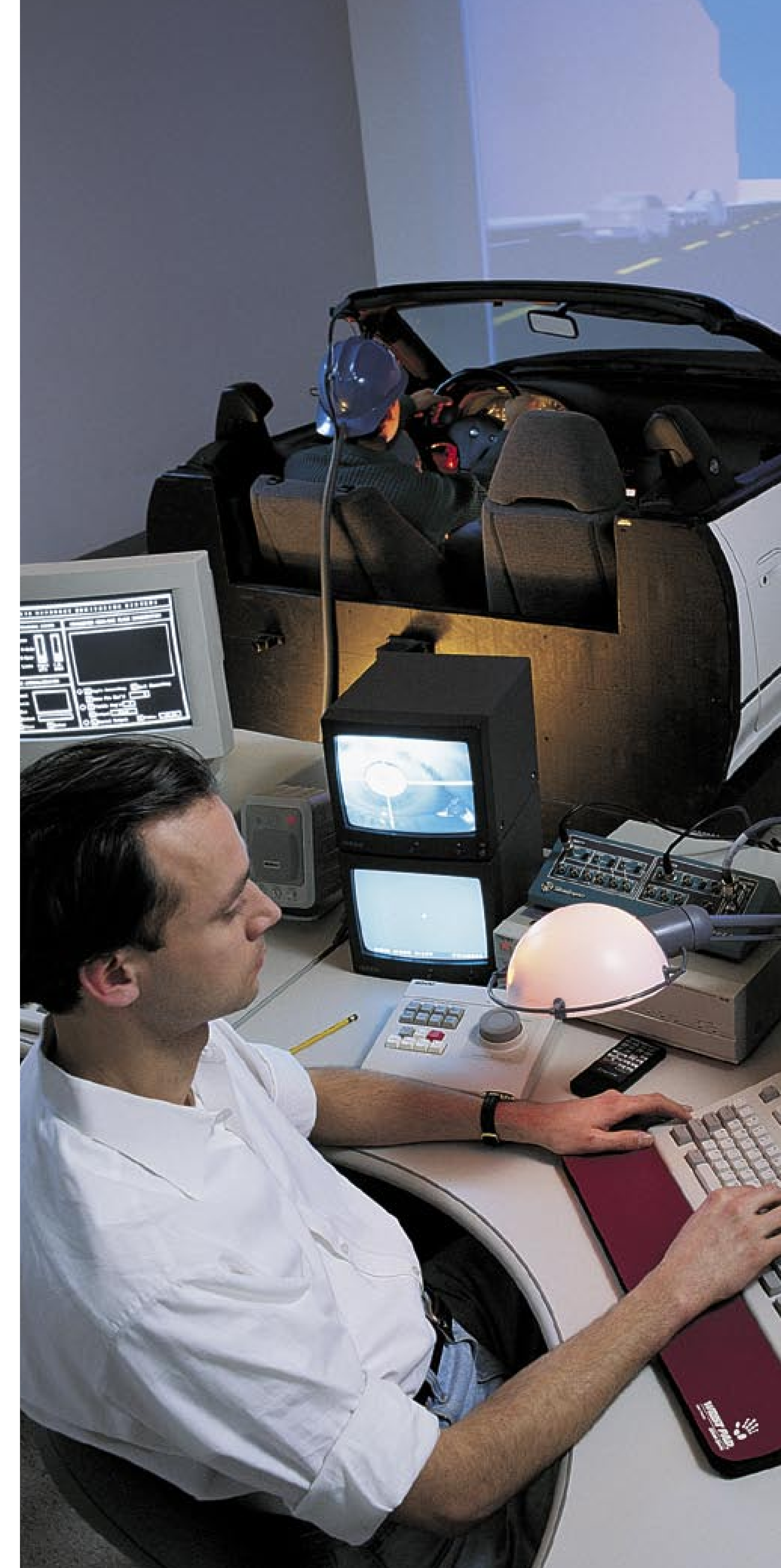
O bien, instalando una batería de micrófonos en la chaqueta, nuestros programas de detección de palabras podrían recordarnos hechos de importancia: cuando alguien mencionase “el contrato del Megacuerdo” el programa podría encargarse de proyectar los datos económicos correspondientes sobre el visor de nuestras gafas. Instalando en los zapatos sensores de posicionamiento global se podría sacar partido de los programas para navegación de altos vuelos con el fin de orientarnos.

Nuestros actuales prototipos de ropas inteligentes utilizan visores montados ante los ojos, para que los usuarios las utilicen con comodidad y discreción. Sus unidades centrales de procesamiento son pequeñas y no estorban. Hemos desarrollado elementos para la entrada de datos de otros tipos que permiten el uso de estos equipos en casi cualquier contexto, y se valen de comunicaciones inalámbricas para permanecer en contacto con Internet.

Nuestro objetivo es ofrecer dispositivos tan pequeños y ligeros, que resulte posible llevarlos puestos en todo momento, de igual forma que llevamos ahora las gafas o el reloj, y que pongan a nuestro servicio potencia computacional en todo instante. Las prendas inteligentes de hoy distan de pasar inadvertidas; en particular, los visores confieren un aspecto bastante “ciberpunk” (vemos bajo el texto, de izquierda a derecha, a Mann, Starner, Picard y Ken Kung). Pero el advenimiento de la computación continua no está lejano. Mann y Starner llevan puestos sus dispositivos todo los días las venticuatro horas.



5. LOS COCHES INTELIGENTES son uno de los objetivos de Nissan Cambridge Basic Research en Massachusetts. Andy Liu, que trabaja allí con el autor, ha ideado un sistema informático que determina las acciones del conductor muy pocos segundos después de haberlas iniciado. El sistema, manejado en la foto de la derecha por Erwin Boer, de Nissan, supervisa el comportamiento del conductor que recorre un trayecto simulado; diversos sensores registran los movimientos de las manos, las piernas y los ojos. Para averiguar lo que el sujeto se propone hacer, se cotejan las lecturas con modelos de actividades típicas durante la conducción. Un coche que supiera que nos disponemos a cambiar de carril podría, por ejemplo, advertirnos de si hay por el camino un camión que no hemos visto.



mente. Describe de dos formas cada globo: mediante una distribución de valores para el color y ubicación del globo, y mediante el "mapa de respaldo", que consiste, en esencia, en una lista que indica qué píxeles pertenecen a cada globo (los píxeles son "elementos de imagen", algo así como los puntos que componen una imagen de televisión). A continuación, Pervisor crea superficies en urdimbre, al objeto de modelizar la escena de fondo. Cada punto de una de estas superficies se halla en correlación con un valor medio de color y una distribución en torno a esa media.

Cuando la cámara de la sala inteligente recoge una imagen nueva en el flujo de vídeo entrante, Pervisor compara esa imagen con los modelos que ha hecho y también con otras referencias. Para empezar, el sistema conjetura qué aspecto debería poseer el modelo globular en la nueva imagen. Por ejemplo, si la mitad superior del cuerpo de una persona se estuvo moviendo hacia la derecha a un metro por segundo durante la última décima de segundo, Pervisor supondrá que el centro del globo representativo del cuerpo se ha movido una décima de metro hacia la derecha. Tales estimaciones se comparan con pautas típicas de movimiento que hemos deducido ensayando el sistema con miles de personas. Sabemos, por ejemplo, que los globos correspondientes al torso han de moverse despacio, mientras que los asociados a las manos y los pies se mueven, por lo general, con mucha mayor celeridad.

Concluidas las predicciones, Pervisor procede a medir la probabilidad de que cada píxel de la nueva imagen pertenezca a cada globo. Lo hace restando los valores de color



de caras. Para la descripción de tales conjuntos nos servimos de una técnica matemática denominada análisis de autovectores; y dimos en llamar a sus resultados “autocaras”. Para modelizar un rostro, el sistema determinaba en qué medida se asemejaba esa cara a cada una de las autocaras.

Esa estrategia ha funcionado bien. Cuando la cámara detecta a una persona, el sistema de identificación extrae su rostro —localizado por Pervisor— de la escena circundante y normaliza su contraste. A continuación, el sistema modeliza el rostro en función de las semejanzas que posea con las autocaras. Acto seguido, compara el modelo con los de personas conocidas. Si alguna de las puntuaciones de semejanza son cercanas, el sistema da por supuesto que ha identificado al usuario. Procediendo así, nuestras salas han reconocido correctamente en un 99 por ciento de las veces rostros individuales en medio de grupos de varios centenares.

La expresión facial reviste importancia pareja a la de la identidad. Un programa didáctico, por ejemplo, debería saber si sus alumnos dan señales de aburrimiento. Así, en cuanto nuestra sala inteligente ha hallado e identificado el rostro de una persona, analiza su expresión. Otro ordenador más compara el movimiento facial registrado por la cámara con mapas descriptivos de los movimientos del rostro que caracterizan diversas expresiones. De hecho, en cada expresión interviene una serie peculiar de contracciones musculares. Al sonreír se curvan hacia arriba las comisuras de los labios y se alzan ciertas partes de la frente; en una sonrisa fingida, empero, sólo es la boca la que se mueve. En experimentos realizados por Irfan A. Essa y el autor, nuestro sistema ha juzgado correctamente las expresiones —en un pequeño grupo de sujetos— en un 98 por ciento de las veces.

El reconocimiento del rostro, de la expresión y del habla de una persona no supone más que el primer paso. Para que las casas, las oficinas o los coches nos presten ayuda, han de poder situar estas percepciones básicas en un contexto. Después de todo, unos mismos movimientos pueden recibir interpretaciones muy diversas, según lo que pretenda quien los realiza. Por ejemplo, al conducir un coche, a veces levantamos el pie del acelerador porque queremos ir más despacio. Pero también hacemos lo mismo cuando nos disponemos a tomar una curva. La diferencia está en que al tomar la curva, además de mover el pie, actuamos sobre el volante. Por tanto, un sistema computarizado necesitaría tener en cuenta cómo han ido cambiando nuestros movimientos con el tiempo, en combinación con otros movimientos, para saber qué estamos haciendo en un instante dado.

En el diseño de un tal sistema hemos tomado prestadas ideas de quienes investigan el reconocimiento del habla. Estos modelizan las palabras mediante secuencias de sonidos, o, por usar su terminología, de estados internos. Cada palabra posee una distribución característica de estados internos, que a veces son fonemas (las unidades últimas del habla) y a veces partes de fonemas. Un sistema computarizado trata de identificar palabras mediante la comparación de las secuencias de sonidos que contienen con modelos de palabras y mediante la selección posterior de las concordancias más verosímiles.

Nosotros hemos generalizado este método con la esperanza de determinar las intenciones de las personas a partir de sus movimientos. Hemos ideado un sistema computarizado que sabe discernir, por ejemplo, si una persona que tiene un brazo extendido está señalando algo o si sólo está desperezándose. El sistema reconoce la acción implícita en la acción de señalar consultando un modelo que consta de tres estados internos: elevar la mano, mantenerla fija y recogerla. El sistema ve el desperezo como un movimiento continuo. Por tanto, por observación de estos estados internos —caracterizados por la aceleración de la mano y la dirección de su movimiento— nuestro sistema averigua lo que una persona está haciendo.

Hemos construido, hasta la fecha, diversos sistemas para interpretar por este método las acciones de personas. El más sencillo permite controlar ambientes virtuales con movimientos del cuerpo. Una de tales aplicaciones es el Ambiente de Vídeo Interactivo de Vida Artificial (AVIVA), un proyecto conjunto de los grupos de Maes y mío (en inglés, ALIVE, “Artificial Life Interactive Video Environment”). AVIVA se vale de una descripción del aspecto corporal del usuario, dada por la sala inteligente, para situar un modelo en vídeo del usuario dentro de una escena de realidad virtual, donde residen “seres vivos” generados por ordenador. Estos animalillos domeñados (“critters”), virtuales, analizan la información sobre los gestos, sonidos y posturas del usuario para decidir de qué forma han de interactuar con éste. Por ejemplo, Silas —un



6. EL LENGUAJE americano de signos está formado por un sistema complejo de gestos de la mano, muchos de los cuales admiten ahora una interpretación en tiempo real gracias a un sistema desarrollado por Thad Starner, del MIT. En la fotografía, la cámara registra los movimientos de la mano de Starner al hacer éste los gestos de "bicicleta". El sistema informático crea un modelo de sus movimientos y lo compara con modelos de señas conocidas. Al producirse la coincidencia, la máquina emite la palabra "bicicleta."

perro virtual— juega a recoger una pelota. Cuando un usuario de una sala inteligente remeda las acciones necesarias para recoger y lanzar la pelota virtual de Silas, el perro ve a la imagen de vídeo hacer lo mismo en el ambiente AVIVA y se dispone a perseguir su juguete. Silas también sabe sentarse y rodar sobre sí mismo cuando se le manda.

Puede lograrse que el egreso de la sala inteligente opere incluso de forma más directa. La postura corporal del usuario puede cartografiarse en una especie de espacio de control, de forma que sus sonidos y gestos modifiquen el funcionamiento de un programa de ordenador. En juegos computarizados, los jugadores han utilizado esta interfaz en vez de una palanca de control o una bola para navegar por ambientes virtuales tridimensionales. Si aparecen adversarios por la izquierda, basta con que el jugador se vuelva hacia la izquierda para hacerles frente; para disparar un arma, basta que el jugador exclame "¡Bang!".

Dejados aparte los juegos de realidad virtual, existen aplicaciones mucho más prácticas de la técnica de salas inteligentes. Entre éstas, mi grupo consideró el Lenguaje Americano de Signos ("ASL, American Sign Language"), un sistema de complejos gestos de la mano que utilizan los sordomudos en mi país. Por tratarse de señas bastante complejas, resultan adecuadas para poner a prueba las destrezas de nuestra sala. A tal fin, Thad Starner y quien escribe nos planteamos la construcción de un sistema para la interpretación del lenguaje en cuestión. Empezamos formando modelos para cada una, observando muchos ejemplos de los movimientos de manos utilizados en la descripción dada por Pervisor. Hallamos que, al comparar estos modelos con los ofrecidos por Pervisor de un usuario real haciendo señas, podíamos traducir con precisión del 99,2 % un subconjunto de 40 palabras dadas por señas. Si logramos aumentar el tamaño del vocabulario que nuestro sistema comprende —y parece verosímil que así sea— quizá podamos crear interfases, para sordos, tan fiables como los sistemas de reconocimiento del habla que se están actualmente introduciendo para personas sin esa minusvalía.

También los conductores de automóviles pueden beneficiarse de la técnica de salas inteligentes. En muchos lugares del mundo desarrollado, el trabajador promedio pasa 10 horas semanales en un coche. Cada año mueren en accidentes de tráfico un número sobrecogedor de personas, accidentes que cabe atribuir en su mayoría a errores del conductor. Por ello, juntamente con Andy Liu, de Nissan Cambridge Basic Research, venimos empeñados en una versión "inteligente" del interior de un automóvil. Nos proponemos, en última instancia, lograr un vehículo capaz de supervisar lo que hace el conductor y suministrarle retroalimentación adecuada, como direcciones de carreteras, instrucciones de manejo e incluso consejos de viaje.

Hemos dado ya algunos pasos. Para recopilar un conjunto de modelos de conducción, en los que figuren las acciones efectuadas al adelantar, ir en caravana, girar, frenar, acelerar o cambiar de carril, nos fijamos en los movimientos de las manos y las piernas de muchos conductores al recorrer un trayecto simulado. Utilizamos los modelos resultantes para clasificar la acción de un conductor de prueba con la máxima rapidez posible. Sorprendentemente, el sistema determinaba lo que el conductor estaba haciendo apenas comenzada su acción. Clasificó acciones con precisión del 86 % al cabo de sólo 0,5 segundos de iniciadas. Concediéndole dos segundos al sistema la precisión se elevó al 97 por ciento.

Hemos comprobado que, al menos en situaciones sencillas, cabe seguir la pista a los movimientos de las personas, identificarlas y reconocer sus expresiones en tiempo real mediante recursos computacionales modestos. Combinando tales facultades, hemos construido salas inteligentes, en las cuales, sin el impedimento de cables ni teclados, los individuos pueden controlar las imágenes presentadas por los ordenadores, jugar con criaturas virtuales e incluso comunicarse a través del lenguaje de los signos. Esta percepción está comenzando a extenderse a una

gama más amplia de situaciones. Por ejemplo, estamos ahora construyendo prototipos de gafas que identifican a nuestros conocidos y nos susurran su nombre al oído. Estamos asimismo trabajando en pantallas de televisión que sepan cuándo se las está mirando. Y proyectamos desarrollar tarjetas de crédito capaces de reconocer a sus propietarios y saber de este modo si han sido robadas.

Otros grupos de investigación del laboratorio de medios del MIT están trabajando para dotar a nuestras salas inteligentes de la facultad de percibir la atención y la emoción, y de este modo adquirir una comprensión más profunda de las acciones y motivos de los humanos. Rosalind W. Picard confía poder idear un sistema que sepa si los conductores —o los alumnos— están atentos o no. Aaron Bobick está redactando programas que interpreten los movimientos en los deportes —imaginemos una cámara de televisión capaz de distinguir entre dos jugadas de fútbol, por ejemplo, entre un túnel y un autopase y de seguir la acción. Con el ulterior desarrollo de la técnica de salas inteligentes, los ordenadores se irán pareciendo más a ayudantes atentos que a instrumentos insensibles. De hecho, no parece descabellado imaginar un mundo en el que la divisoria entre objetos animados e inanimados comience realmente a difuminarse.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FACIAL EXPRESSION RECOGNITION USING A DYNAMIC MODEL AND MOTION ENERGY. I. A. Essa y A. P. Pentland en *Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision*. IEEE Computer Society Press, 1995.

TOWARD AUGMENTED CONTROL SYSTEMS. A. P. Pentland y A. Liu en *Proceedings of the Intelligent Vehicles'95 Symposium*. IEEE Industrial Electronics Society, septiembre de 1995.

REAL-TIME AMERICAN SIGN LANGUAGE FROM VIDEO USING HIDDEN MARKOV MODELS. T. Starner y A. P. Pentland en *International Symposium on Computer Vision, 1995*. IEEE Computer Society Press, 1995.

PFINDER: REAL-TIME TRACKING OF THE HUMAN BODY. C. Wren, A. Azarbayejani, T. Darrell y A. Pentland en *Integration Issues in Large Commercial Media Delivery Systems*. Recopilación de A. G. Tescher y V. M. Bove. SPIE, vol. 2615; 1996.

Muchos artículos e informes técnicos están disponibles en http://www-white.media.mit.edu/vismod

El origen de las células eucariotas

Animales, plantas y hongos deben su existencia a una transformación en virtud de la cual bacterias diminutas y elementales se convirtieron en células grandes y dotadas de una organización compleja

Christian de Duve

Hace unos 3700 millones de años aparecieron sobre la Tierra los primeros seres vivos. Eran microorganismos pequeños, unicelulares, no muy distintos de las bacterias actuales. A las células de ese tenor se las clasifica entre los procariotas, porque carecen de núcleo (*karyon* en griego), un compartimento especializado donde se guarda la maquinaria genética. Los procariotas alcanzaron pleno éxito en su desarrollo y multiplicación. Gracias a su notable capacidad de evolución y adaptación, dieron origen a una amplia diversidad de especies e invadieron cuantos hábitats el planeta podía ofrecerles.

La biosfera estaría repleta de procariotas si no se hubiera dado el avance extraordinario del que surgió una célula perteneciente a un tipo muy distinto: eucariota, es decir, que posee un núcleo genuino. (El prefijo *eu*, de origen griego, significa "bueno".) Las consecuencias de este acontecimiento marcaron el inicio de una nueva época. En nuestros días todos los organismos pluricelulares están constituidos por células eucariotas, que tienen una complejidad mucho mayor que las procariotas. Si no hubieran aparecido las células eucariotas, no existiría ahora la extraordinaria variedad, tan rica en gamas, de la vida animal y vegetal en nuestro planeta; ni tampoco habría hecho acto de presencia el hombre para gozar de tamaña diversidad y arrancarle sus secretos.

Las células eucariotas surgieron con toda probabilidad de antepasados procariotas. Pero, ¿cómo? De entrada se trata de una cuestión difícil de abordar. No han sobrevivido representantes de las etapas intermedias, ni nos han dejado fósiles que proporcionen alguna pista directa. Sólo podemos examinar el producto eucariota final, algo realmente diferente de cualquier célula procariota. Sin embargo, el problema ha dejado de ser insoluble. Con las herramientas de la moderna biología, los investigadores han descubierto parentescos reveladores entre bastantes rasgos eucariotas y procariotas, que arrojan luz sobre el proceso a través del cual los eucariotas pudieron originarse a partir de células procariotas.

Para poder apreciar esa asombrosa trayectoria de la evolución necesitamos conocer, siquiera en sus grandes líneas, las diferencias fundamentales entre ambos tipos de células. Las eucariotas tienen un tamaño mucho mayor que las células procariotas (en términos de volumen unas 10.000 veces); asimismo, el depósito de su información genética está mucho más organizado en las primeras. En las células procariotas todo el archivo genético se halla constituido por un solo cromosoma, formado por una ristra de ADN circular que está en contacto directo con el resto de la célula. En las células eucariotas la mayor parte del ADN se almacena, de un modo mucho más estructurado, en los cromosomas. Estos se agrupan a su vez dentro de un recinto central bien definido, el núcleo. La región que rodea el núcleo (el citoplasma) está segmentada por una serie de membranas que dan lugar a una elaborada red de compartimentos que cumplen funciones muy dispares. Los elementos esqueléticos del interior citoplasmático aportan a las células eucariotas el sostén estructural interno. Con la ayuda de diminutos motores moleculares, tales elementos capacitan a las células para que los compartimentos intercambien entre sí su contenido y los propulsen en sus movimientos de un sitio a otro.

Además, la mayoría de las células eucariotas se distinguen de las procariotas por la existencia, en su



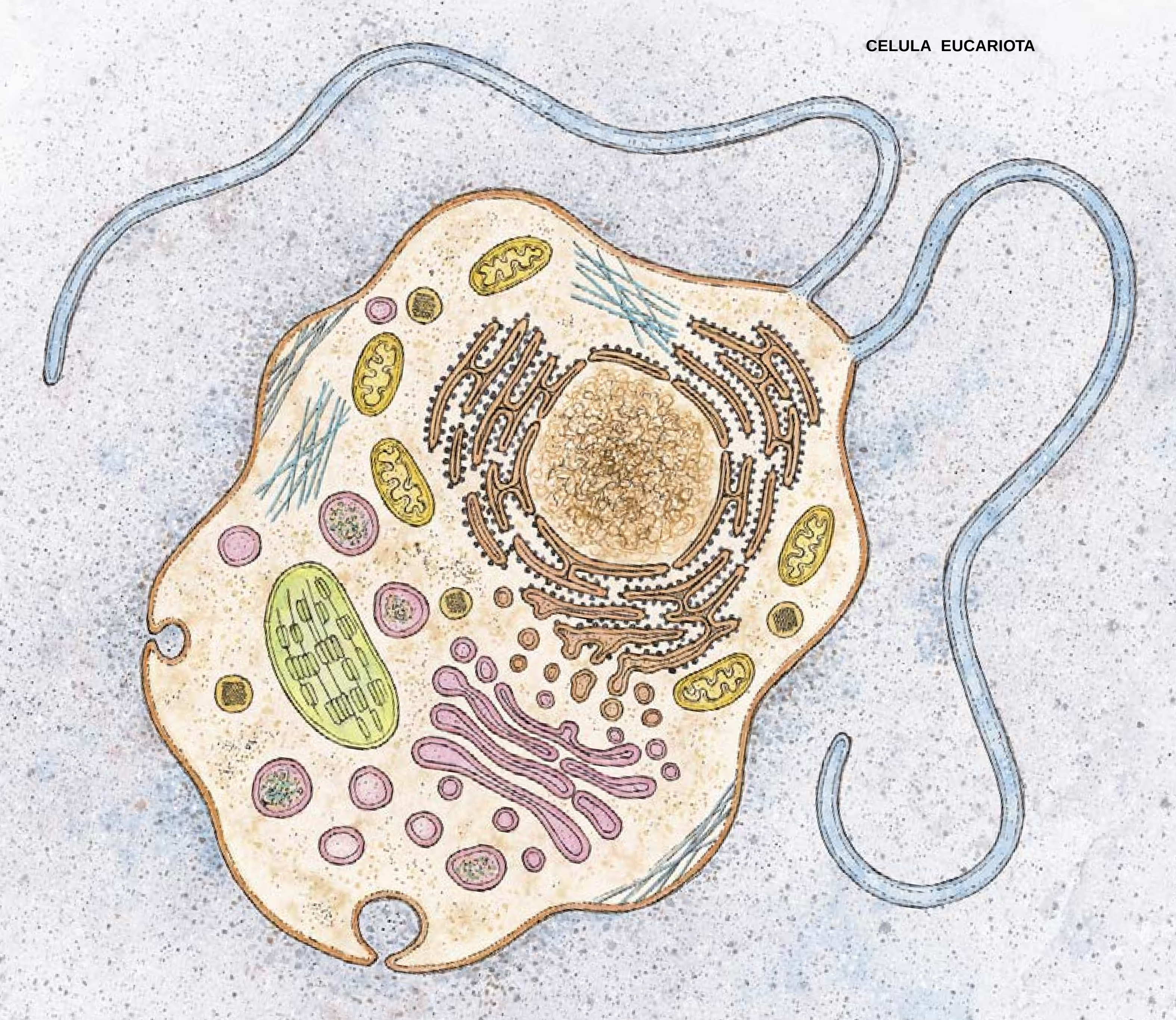
1. CELULAS procariotas y eucariotas. Difieren en tamaño y complejidad. Las primeras (*derecha*) miden en torno a un micrometro de diámetro; el de las células eucariotas oscila entre diez y treinta micrometros. Estas últimas, representadas aquí por un alga verde hipotética (*página siguiente*), presentan múltiples estructuras especializadas y diversas, incluido un núcleo diferenciado que contiene el conjunto principal del material genético de la célula.

citoplasma, de varios millares de estructuras organizadas, los orgánulos, cuyo tamaño viene a ser el de una célula procariota. Entre los orgánulos, destacan los peroxisomas (que realizan diversas funciones metabólicas), las mitocondrias (centrales energéticas de las células) y, en las algas y células vegetales, los plastos (donde acontece la fotosíntesis). Con semejante variedad de orgánulos e intrincadas estructuras internas, hasta los eucariotas unicelulares, pensemos en levaduras o amebas, resultan organismos dotados de extraordinaria complejidad.

La organización de las células procariotas es mucho más rudimentaria. Y, sin embargo, procariotas y eucariotas están, sin ningún género de dudas, emparentados. Eso se hace patente en cuanto nos fijamos en sus múltiples semejanzas genéticas. Se ha podido establecer la época aproximada en que la rama eucariota se desprendió del tronco procariota. Dicha divergencia comenzó en un pasado remoto, distante probablemente más de 3000 millones de años. Los acontecimientos posteriores en el desarrollo de los eucariotas, que pudieron suceder en el transcurso de más de mil millones de años, estarían aún envueltos en el misterio si no hubiera sido por una pista iluminadora, surgida del análisis de numerosos orgánulos alojados en el citoplasma.

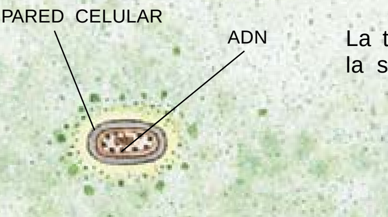
Desde hacía más de un siglo, venían los biólogos sospechando que las mitocondrias y los plastos descendían de bacterias adoptadas por alguna célula hospedadora como endosimbiontes (etimológicamente, “vivir juntos en el interior”). Pero la idea no empezó a gozar del favor de los expertos hasta que la recuperó Lynn Margulis en 1967, quien trabajaba en la Universidad de Boston; desde entonces Margulis la ha defendido con ardor, al principio no sin fuerte oposición. No necesitamos ya de sus dotes persuasivas. Las pruebas del origen bacteriano de mitocondrias y plastos son hoy aplastantes.

Los datos más convincentes son la presencia en estos orgánulos de un sistema genético vestigial, aunque funcional. Ese sistema abarca genes

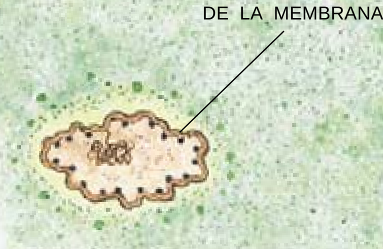


Primeros pasos en la evolución de una célula eucariota

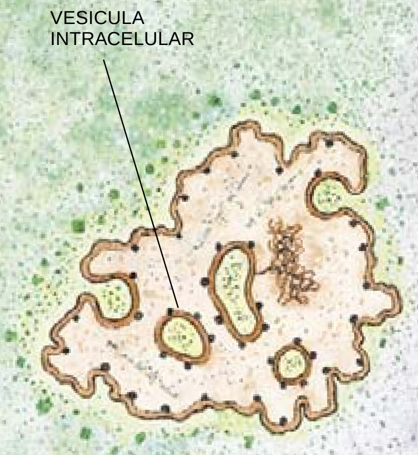
La transformación de una célula procariota en eucariota pudo haber comenzado con la serie de cambios esquematizados en estas dos páginas.



CON LA PERDIDA DE LA PARED CELULAR empezaría probablemente todo. La célula se quedó revestida de sólo una membrana flexible con muchos ribosomas adosados (*puntos negros*); en los ribosomas se ensamblan las proteínas que sirven aquí para la síntesis de enzimas digestivas que se liberan al exterior.



LAS ONDULACIONES de la membrana celular permitieron que la célula alcanzara mayor tamaño. Los pliegues resultantes aumentaron, en efecto, la superficie para la absorción de nutrientes del entorno (*verde*). Las enzimas digestivas degradaban todavía el material sólo en el exterior de la célula.



MERCED AL PLEGAMIENTO interno de la membrana, se formaron recodos que originaron compartimentos interiores aislados. La digestión ocurría ahora dentro y fuera de la célula. La internalización del fragmento de membrana al que estaba anclado el ADN dio lugar a un sáculo con el ADN unido, precursor del núcleo celular.

vinculados al ADN, los medios necesarios para replicar el ADN y las herramientas moleculares requeridas para la construcción de proteínas a partir de los planos escondidos en el ADN. Unas cuantas propiedades caracterizan este aparato genético como similar al de los procariotas y lo distinguen, además, del principal sistema genético eucariota.

A menudo, se presenta la adopción endosimbiótica cual si se tratara del resultado de algún tipo de encuentro —predación agresiva, invasión pacífica, asociación o fusión mutuamente beneficiosa— entre dos procariotas típicos. Pero esa suerte de descripciones induce a confusión: las bacterias modernas no muestran ese comportamiento. Más aún, la mera unión de simples procariotas dejaría sin justificar otras peculiaridades de las células eucariotas. Hay una explicación mucho más directa, que la propia naturaleza sugiere. De acuerdo con ella, los endosimbiontes fueron engullidos para alimentación de una célula de dimensiones mucho mayores, que había adquirido ya muchas de las propiedades que hoy definen a las células eucariotas.

Muchas células eucariotas actuales —los leucocitos, por ejemplo— engullen procariotas. Por regla general, los microorganismos atrapados mueren y se someten a degradación. A veces escapan a la destrucción, continúan dañando a los captores y llegan incluso a causarles la muerte. En alguna rara ocasión, captor y víctima sobreviven en un estado de mutua tolerancia, que puede tornarse después en asistencia recíproca y, por último, incluso en dependencia. Mitocondrias y plastos podrían así haber sido huéspedes permanentes de una célula que los albergó.

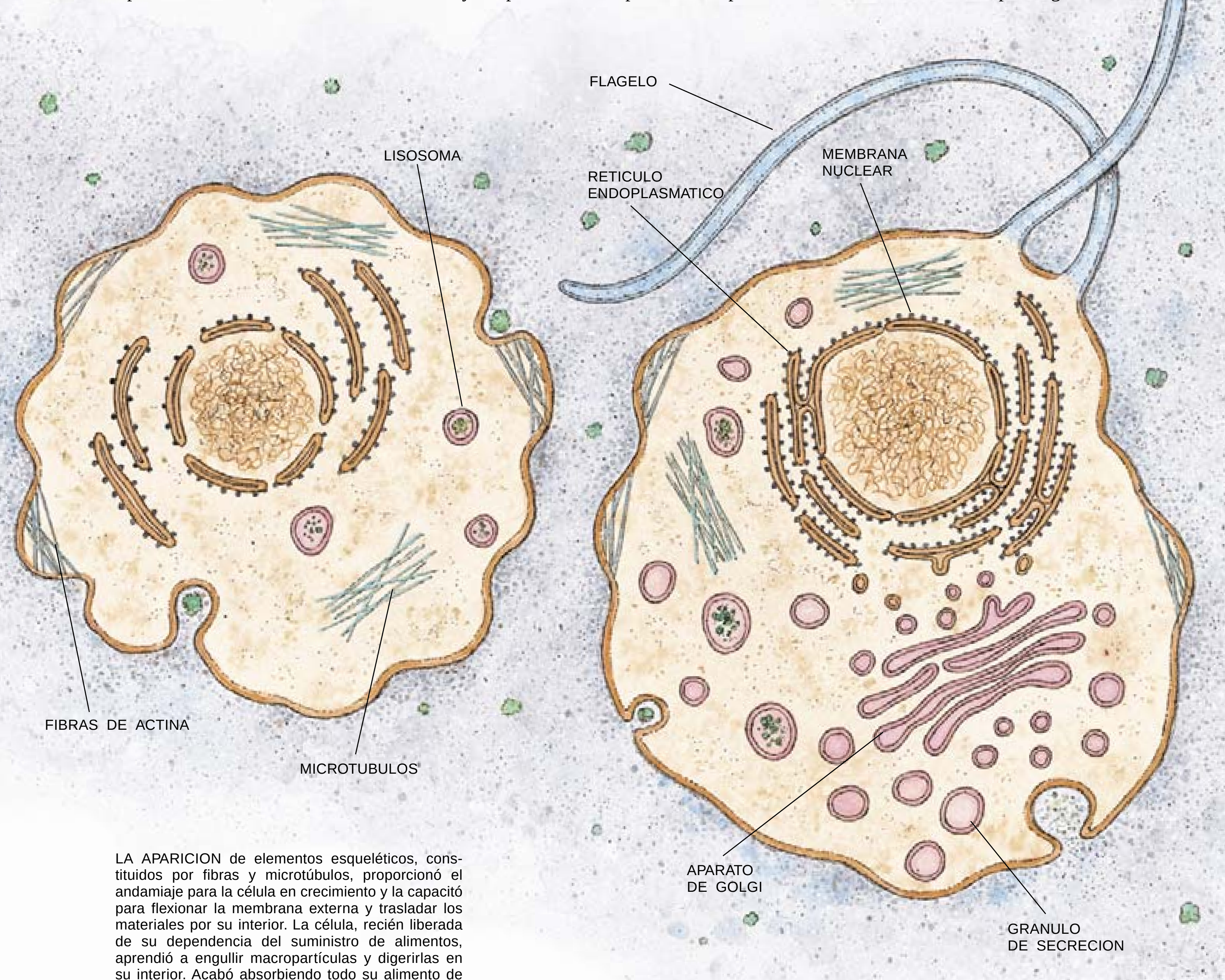
Si este supuesto es cierto, revela bastantes cosas acerca de los primeros pasos en la evolución del hospedador. La adopción de endosimbiontes hubo de ser la consecuencia de una etapa previa, en la que un antepasado procariota de los eucariotas evolucionó hasta desarrollarse un fagocito primitivo (término griego que significa "célula que come"), una célula capaz de engullir cuerpos del volumen de las bacterias. Y si esta célula primitiva guardaba alguna semejanza con los fagocitos que hoy conocemos, tuvo que haber sido de un tamaño mayor que el de su presa y estar rodeada por una membrana flexible, capaz de ceñir objetos extracelulares voluminosos. Estos primeros fagocitos debieron de contar, además, con una red interna de compartimentos conectados con la membrana externa y estar preparados para degradar los materiales ingeridos. También habrían dispuesto de una suerte de esqueleto interno que

CHRISTIAN DE DUVE compartió en 1974 el premio Nobel de fisiología y medicina con Albert Claude y George Palade "por sus descubrimientos relacionados con la estructura y organización funcional de la célula". Divide su tiempo entre la Universidad Católica de Lovaina y la Rockefeller de Nueva York. Autor de *La célula viva*, ha fundado el Instituto Internacional de Patología Celular y Molecular.

les sirviera de sostén estructural, y portarían probablemente una maquinaria molecular capaz de deformar la membrana externa y mover de un sitio a otro el contenido interno.

El desarrollo de ese tipo de estructuras celulares representa la esencia de la transición de procariotas a eucariotas. El problema mayor estribaría en el diseño de una explicación plausible de la construcción progresiva de estos rasgos que fuera congruente con la operación de la selección natural. Cada cambio pequeño introducido en la célula tiene que haber incrementado su posibilidad para sobrevivir y reproducirse (con una ventaja selectiva), de suerte que la innovación se extendiera con rapidez por el conjunto de la población.

¿Qué fuerzas habrán impulsado la evolución de un procariota primitivo hacia una moderna célula eucariota? Antes de responder a la cuestión es forzoso hacer algunas consideraciones y aceptar ciertos supuestos. En primer lugar, que la célula ancestral se alimentaba de los desechos excretados por otros organismos; era lo que los biólogos denominan heterótrofo. Vivía, pues, en un medio donde encontraba el alimento. Quizá residiera, y ésa es una posibilidad interesante, en colonias mixtas de procariotas del estilo de las que han fosilizado en capas rocosas de estromatolitos. Todavía hoy perviven colonias de estromatolitos, formadas por capas de heterótrofos cubiertas por organismos



LA APARICION de elementos esqueléticos, constituidos por fibras y microtúbulos, proporcionó el andamiaje para la célula en crecimiento y la capacitó para flexionar la membrana externa y trasladar los materiales por su interior. La célula, recién liberada de su dependencia del suministro de alimentos, aprendió a engullir macropartículas y digerirlas en su interior. Acabó absorbiendo todo su alimento de esta forma, utilizando enzimas que se vertían a los sáculos digestivos por medio de una red de compartimentos interiores en expansión. Algunos de estos compartimentos se aplanaron y rodearon el conjunto, cada vez mayor, de ADN.

POR FIN, SE DESARROLLO un fagocito primitivo, como consecuencia de una serie creciente de cambios evolutivos. Esta célula utilizaba flagelos, proyecciones en forma de látigo, para su propulsión. El fagocito adquirió también un núcleo verdadero (a medida que los compartimentos que rodeaban el ADN se fundieron entre sí), junto con una familia cada vez más compleja de estructuras celulares que evolucionaron a partir de trozos internalizados de la membrana celular.

fotosintéticos que se multiplican con la ayuda de la luz solar y suministran alimentos a las capas subyacentes. El registro fósil nos revela que ese tipo de colonias existía ya hace más de 3500 millones de años.

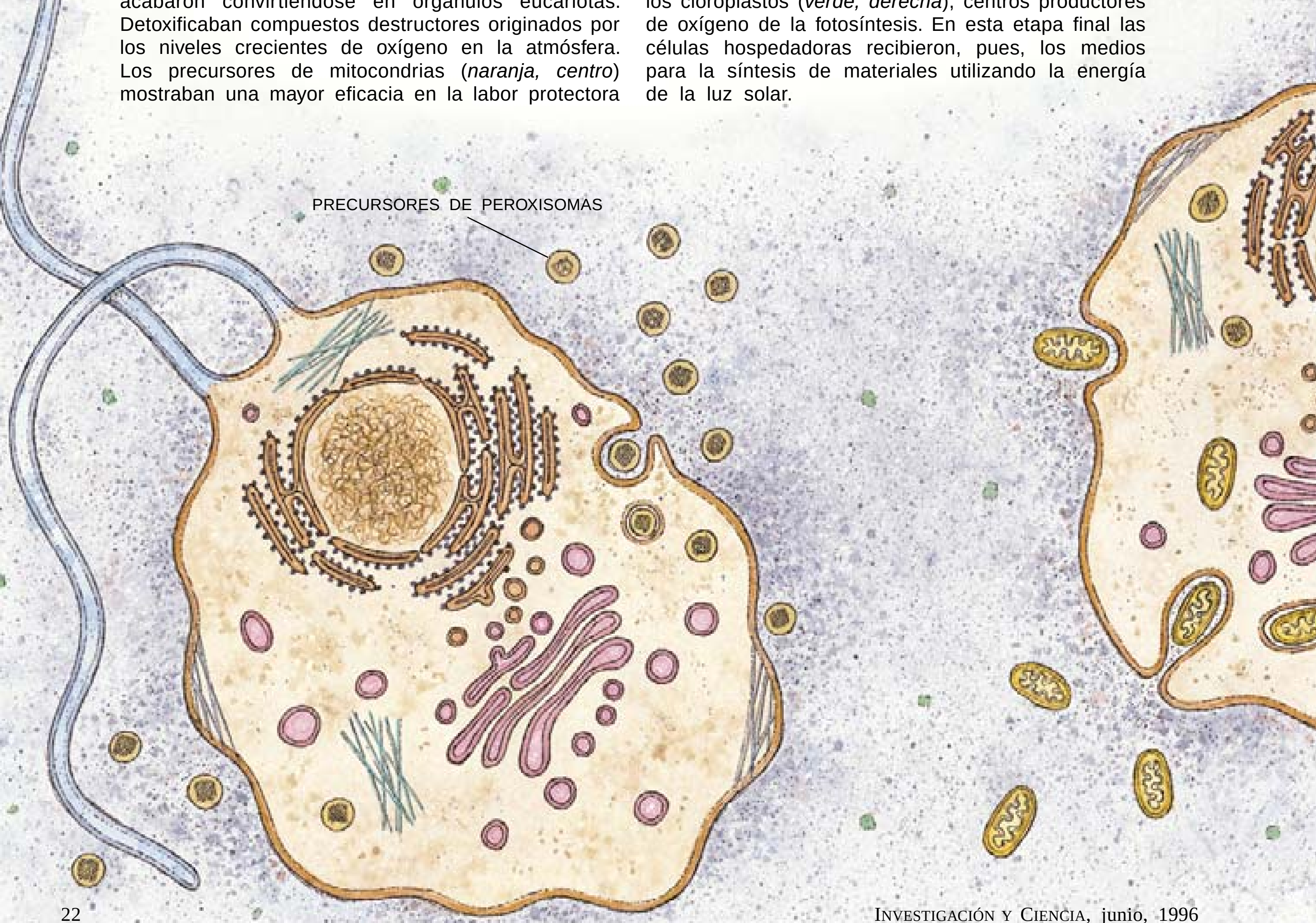
De acuerdo con una segunda hipótesis, corolario de la primera, el organismo ancestral tenía que digerir su alimento. Debemos suponer que ello sucedió (a la manera de lo que observamos en la mayoría de los modernos procariotas heterótrofos) por medio de enzimas segregadas que descomponen el alimento fuera de la célula. Es decir, la digestión enzimática acontecía antes que la ingestión.

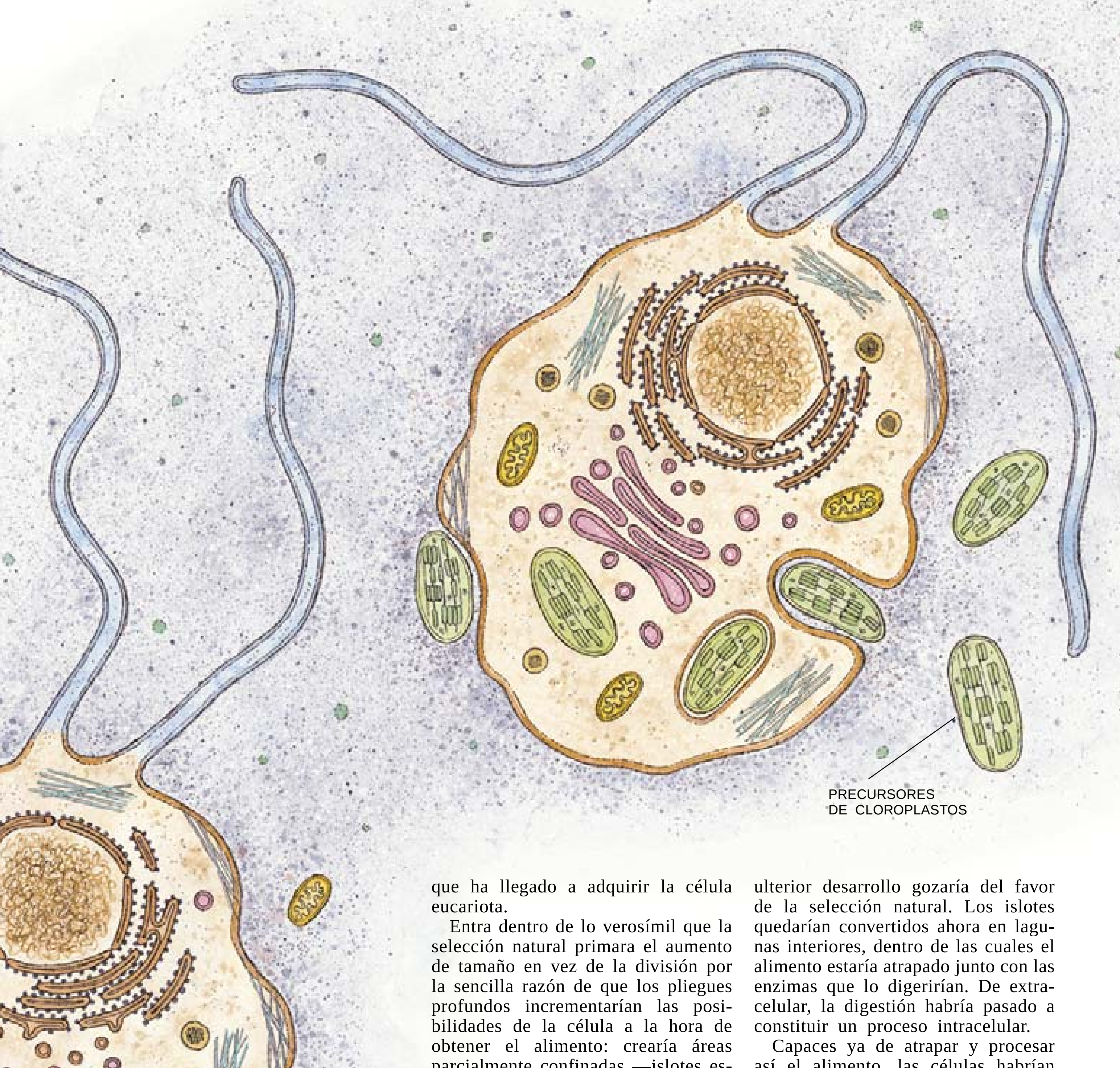
Por último, se parte del supuesto según el cual el organismo habría perdido la capacidad de elaborar una pared celular, la cubierta rígida que rodea la mayoría de los procariotas y que les proporciona el sostén y protección estructural necesarios frente a las agresiones externas. Pese a su fragilidad, existen todavía, incluso en ambientes hostiles, formas desnudas de este tipo que poseen vida independiente. En el caso que estamos considerando, la colonia de estromatolitos ofrecería al organismo primitivo un refugio excelente.

Aceptadas estas tres premisas, podemos imaginarnos el organismo ancestral como una burbuja flexible, aplastada, dotada de poderosa capacidad para cambiar de forma y en contacto directo con el alimento. Una célula de este tipo vería allanado el camino para crecer y multiplicarse mejor que sus parientes encerrados entre paredes. Para crecer, no necesitaría, sin embargo, responder con un reflejo automático de división, como sucede con la mayoría de las células. Cabría un comportamiento alternativo, en el que resultaran fáciles la expansión y el plegamiento de la membrana envolvente, incrementando así la superficie disponible para la captación de nutrientes y la excreción de los materiales de desecho, factores ambos limitantes del crecimiento de cualquier célula. La capacidad para crear una superficie con pliegues profundos permitiría al organismo expandirse hasta alcanzar tamaños mucho mayores que los de los procariotas habituales. Los procariotas gigantes de nuestros días poseen una membrana externa con profundos surcos y hendiduras, un probable requisito previo para el enorme diámetro que llegan a alcanzar. Recibe así cómoda explicación el enorme tamaño

Ultimos pasos en la evolución de una célula eucariota

La adopción de procariotas como huéspedes permanentes del interior de fagocitos, mayores en talla, señaló la fase final de la evolución de las células eucariotas. Los precursores de los peroxisomas (*beige, izquierda*) pudieron ser los primeros procariotas que acabaron convirtiéndose en orgánulos eucariotas. Detoxificaban compuestos destructores originados por los niveles crecientes de oxígeno en la atmósfera. Los precursores de mitocondrias (*naranja, centro*) mostraban una mayor eficacia en la labor protectora de las células hospedadoras frente al oxígeno; dotaron a éstas de una ulterior capacidad, la de generar trifosfato de adenosina (ATP), una molécula rica en energía. El desarrollo de peroxisomas y mitocondrias permitió la adopción de precursores de plastos, como los cloroplastos (*verde, derecha*), centros productores de oxígeno de la fotosíntesis. En esta etapa final las células hospedadoras recibieron, pues, los medios para la síntesis de materiales utilizando la energía de la luz solar.

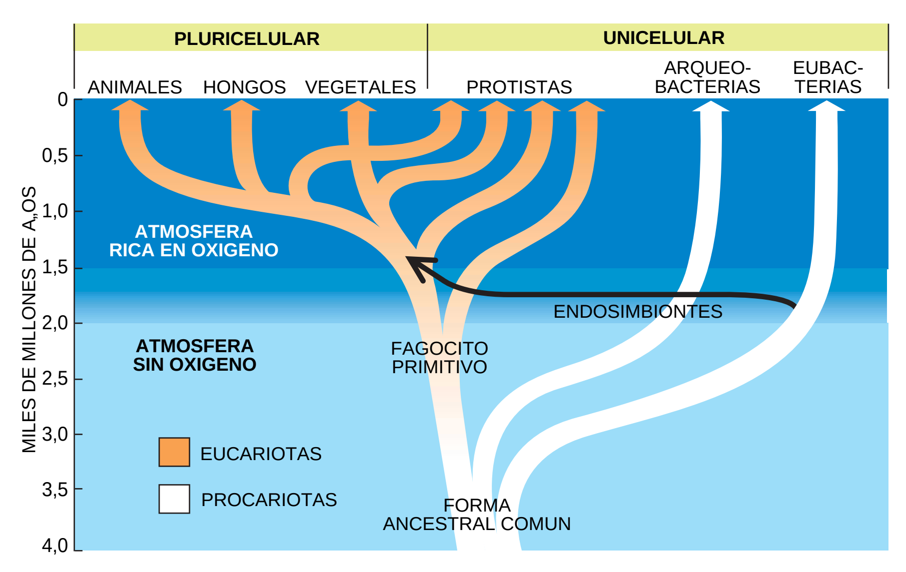




que ha llegado a adquirir la célula eucariota.

Entra dentro de lo verosímil que la selección natural primara el aumento de tamaño en vez de la división por la sencilla razón de que los pliegues profundos incrementarían las posibilidades de la célula a la hora de obtener el alimento: crearía áreas parcialmente confinadas —islotes estrechos a lo largo de las accidentadas costas celulares— en cuyo interior habría elevadas concentraciones de enzimas digestivas que degradarían de un modo más eficiente el alimento. Ahí, precisamente, pudo producirse un avance decisivo: dada la propensión de las membranas biológicas para el autosellado (tal y como ocurre con las pompas de jabón), no hace falta mucha imaginación para ver cómo los pliegues podrían desprenderse y formar sáculos intracelulares. Una vez iniciado este proceso, como un efecto colateral más o menos aleatorio de la expansión de la membrana, cualquier cambio genético que promoviera su ulterior desarrollo gozaría del favor de la selección natural. Los islotes quedarían convertidos ahora en lagunas interiores, dentro de las cuales el alimento estaría atrapado junto con las enzimas que lo digerirían. De extracelular, la digestión habría pasado a constituir un proceso intracelular.

Capaces ya de atrapar y procesar así el alimento, las células habrían dado un paso gigantesco hacia la explotación de lo que el entorno les ofrece; no menor habría sido el empuje consiguiente en su potencial de supervivencia y reproducción. Estas células habrían adquirido los rasgos fundamentales de la fagocitosis: la captación de objetos extracelulares mediante el cierre de pliegues de la membrana (endocitosis), seguido de la degradación de los materiales engullidos dentro de las bolsas digestivas intracelulares (lisosomas). Todo lo que vino después pueden considerarse retoques evolutivos, importantes y útiles, aunque no esenciales. Los sáculos intracelulares primitivos



2. ESTE ARBOL EVOLUTIVO muestra los acontecimientos principales de la historia de la vida. Se trata de un guión cronológico aceptado por la mayoría, aunque recientemente lo ha puesto en cuestión el grupo que lidera Russell F. Doolittle, de la Universidad de California en San Diego. Aducen éstos que el último antepasado común de todos los seres vivos existió hace algo más de dos mil millones de años.

dieron lugar de manera gradual a muchas subsecciones especializadas, formando lo que se conoce como el sistema de citomembranas, característico de cualquier célula eucariota actual. Modelo que recibe sólido respaldo de la observación a tenor de la cual muchos sistemas presentes en la membrana celular de los procariotas se encuentran en diversas partes del sistema de citomembranas de los eucariotas.

Reviste el mayor interés fijarse en que la génesis del núcleo —el elemento estructural más característico de las células eucariotas— puede explicarse, al menos de manera esquemática, como el resultado de la internalización de una zona de la membrana externa de la célula. En los procariotas el cromosoma de ADN circular está unido a la membrana. El plegamiento interno de este fragmento de la membrana celular podría dar origen a un saco intracelular que llevase prendido en su superficie el cromosoma. Esa estructura podría haber constituido el germen del núcleo eucariota, que está rodeado por una membrana doble formada por partes aplanadas del sistema intracelular de membranas que se funde para dar una envoltura esférica.

Este guión explica la evolución plausible de un pequeño procariota hacia una célula gigante que reuniera algunas de las notas principales de las células eucariotas, a saber, núcleo con envoltura propia, vasta red de membranas internas y capacidad de atrapar alimento y digerirlo internamente. Semejante progreso podría haberse desarrollado a través de un número altísimo de etapas, casi imperceptibles, cada una de las cuales habría potenciado la autonomía de la célula y le habría conferido una ventaja selectiva. Pero había una exigencia. Una vez perdido el apoyo de la rígida membrana externa, la célula precisaría un cierto andamiaje que le permitiera asegurar el incremento de tamaño.

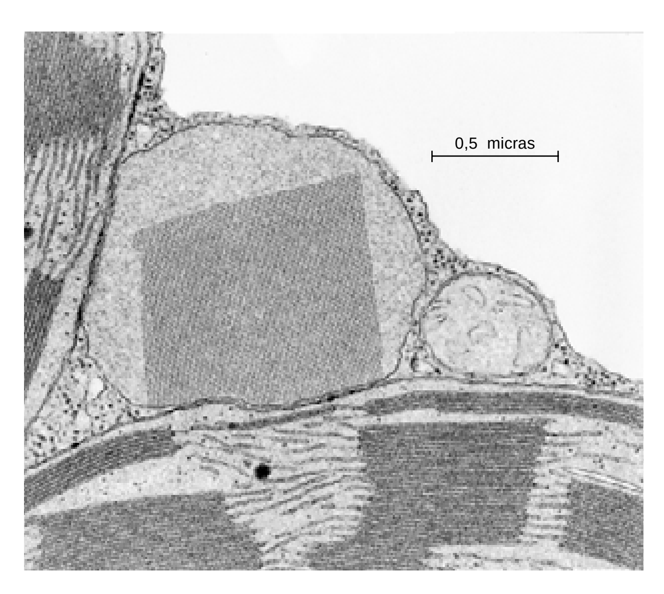
Las células eucariotas actuales están reforzadas por estructuras fibrosas y tubulares, asociadas a menudo con diminutos motores, que posibilitan el tráfico de materiales por el interior celular. No hay en los procariotas los equivalentes de muchas de estas proteínas que constituyen dichos sistemas. Por consiguiente, tuvo que darse un número elevado de auténticas innovaciones para que se forjara el sistema citoesquelético. Nada se sabe acerca de estos acontecimientos fundamentales del curso de la evolución, excepto que muy probablemente estuvieron asociados con el aumento del tamaño celular y la expansión de las membranas, procesos estos que irían gradualmente apareciendo.

Al final de tan largo camino se encontraría el fagocito primitivo: una célula dotada una organización eficiente para alimentarse de bacterias, un poderoso cazador que habría dejado de estar condenado a residir entre depósitos de alimento y ahora podría moverse con entera libertad por el mundo persiguiendo activamente su presa, una célula dispuesta, cuando llegara el momento, a convertirse en el hospedador de los endosimbiontes.

Cabe esperar que estas células, que aún carecían de mitocondrias y otros orgánulos clave característicos de las actuales células eucariotas, hubieran invadido muchos nichos llenándolos con una progenie con una diversidad de adaptaciones. Pero hemos de añadir en seguida que muy pocos de estos descendientes, por no decir ninguno, han conseguido sobrevivir hasta nuestros días. Existen algunos eucariotas unicelulares que carecen de mitocondrias, pero no puede excluirse la posibilidad de que sus antepasados hubieran poseído mitocondrias que luego perdieran. En definitiva, pues, todos los eucariotas podrían muy bien haber evolucionado a partir de fagocitos primitivos que hubieran incorporado los precursores de las mitocondrias.

No se ha resuelto la polémica sobre si se produjeron, en el curso de la evolución, una o múltiples adopciones. La opinión mayoritaria defiende que las mitocondrias surgieron de un tronco común. Se acepta que la adopción de las mitocondrias salvó una línea de células eucariotas del peligro de extinción o confirió tal ventaja selectiva; su predominio provocó la extinción casi universal de las que no las habían adquirido. ¿Por qué esa importancia tan aplastante de las mitocondrias?

En las células actuales, las mitocondrias cumplen una función principal: llevar a cabo, gracias al oxígeno, la combustión de los metabolitos procedentes de los nutrientes para sintetizar trifosfato de adenosina (ATP), un compuesto rico en energía. La vida depende en buena medida de este proceso que es el suministrador fundamental de energía para la mayoría de los organismos aerobios, es decir, dependientes del oxígeno. Sin embargo, cuando las primeras células hicieron su aparición sobre la Tierra, no había ni rastro de oxígeno en la atmósfera. El oxígeno molecular libre es un producto de la vida; comenzó a generarse cuando las cianobacterias, microorganismos fotosintéticos, aparecieron sobre la Tierra. Estas células recurren a la energía de la luz solar para extraer de las moléculas de agua el hidrógeno que necesitan en la construcción de su propio organismo, dejando libre como subproducto el oxígeno molecular. El oxígeno comenzó a penetrar en la atmósfera en cantidades apreciables hace unos 2000 millones de años, cuantía que se elevó progresivamente hasta alcanzar



3. CUATRO ORGANULOS aparecen en una hoja de tabaco. Los dos cloroplastos (*izquierda y abajo*) y la mitocondria (*centro, derecha*) surgieron a partir de endosimbiontes procariotas. El peroxisoma (*centro*) —que contiene una inclusión cristalina prominente, muy probablemente constituida por la enzima catalasa— puede haberse derivado también de un endosimbionte.

un nivel estable hace 1500 millones de años.

Antes de la aparición del oxígeno atmosférico, todas las formas de vida tuvieron que adaptarse a un entorno anaerobio, carente de oxígeno. Observando lo que ocurre con los anaerobios estrictos de nuestros días, serían, cabe presumirlo, sumamente sensibles al oxígeno. En el interior de las células, el oxígeno genera grupos funcionales químicos que son tóxicos. Entre estos venenos celulares se encuentran el ion superóxido, el radical hidroxilo y el peróxido de hidrógeno. Cuando hace dos mil millones de años se elevó la concentración de oxígeno, probablemente muchos de los organismos primitivos cayeron víctimas del “holocausto del oxígeno”. Había entre los supervivientes células que hallaron refugio en lugares a los que no llegara el oxígeno o que habían desarrollado un sistema de protección frente a la toxicidad del oxígeno.

Estos hechos apuntan hacia una hipótesis bastante sugestiva. El precursor fagocítico de los eucariotas, posiblemente anaerobio, fue rescatado de la crisis del oxígeno por antepasados aerobios de las mitocondrias: células que no sólo destruían el oxígeno tóxico (convirtiéndolo en agua inocua), sino que incluso lo convertían en un aliado extraordinariamente útil. Esta hipótesis, que ha gozado de gran predicamento, explicaría de una manera muy elegante el efecto salvador de la adopción de las mitocondrias.

Pero el guión entraña una dificultad grave. La adaptación al oxígeno tuvo lugar muy probablemente de una manera gradual, comenzando con sistemas primitivos de detoxificación del oxígeno. Hubo de transcurrir un largo período antes de alcanzarse las finas complejidades de las mitocondrias actuales. ¿Cómo consiguieron sobrevivir los fagocitos anaerobios todo el tiempo que pasó antes de que surgieran los antepasados de las mitocondrias?

Hay una solución de este rompecabezas que viene sugerida por la presencia, en las células eucariotas, de otros orgánulos consumidores de oxígeno. Presentan pareja distribución general en plantas y animales como las mitocondrias, aunque su estructura y composición sean mucho más primitivas. Se trata de los peroxisomas [*véase* “Microcuerpos celulares”, por Christian de Duve; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1983]. Los peroxisomas, al igual que las mitocondrias, llevan a cabo reacciones metabólicas oxidativas. Sin embargo, a diferencia de las mitocondrias, no utilizan la energía extraída de estas reacciones para sintetizar ATP, sino que la liberan en forma de calor. En el proceso, convierten el oxígeno en peróxido de hidrógeno, pero a continuación destruyen este compuesto peligroso con la ayuda de una enzima llamada catalasa. Los peroxisomas contienen también una enzima que elimina el ion superóxido. Están, por tanto, cabalmente cualificados para defender de la toxicidad del oxígeno.

Presenté ya este guión argumentativo en 1969, cuando se creía que los peroxisomas eran componentes especializados del sistema de citomembranas. Por eso incluí los peroxisomas dentro del modelo general de expansión de membranas que había propuesto para explicar el desarrollo del fagocito primitivo. Después, los experimentos de Brian H. Poole, ya desaparecido, y de Paul B. Lazarow, colaboradores míos en la Universidad de Rockefeller, demostraron de una manera concluyente que los peroxisomas no guardaban relación alguna con el sistema de citomembranas. Antes bien, adquirían sus proteínas de una manera semejante a como lo hacen las mitocondrias y plastos (por un proceso que explicaré en seguida). Parecía, pues, razonable pensar que estos tres orgánulos hubieran comenzado siendo endosimbiontes. En coherencia con ello revisé, en 1982, mi tesis original y sugerí que los peroxisomas podrían provenir de bacterias aerobias primitivas cuya adopción precedió a la de las mitocondrias. Estos precoces detoxificadores de oxígeno podrían haber protegido a sus células hospedadoras durante todo el tiempo que transcurrió antes de que los antepasados de las mitocondrias alcanzaran la elevada eficiencia que poseyeron al adoptarlas.

Hasta ahora los investigadores no han obtenido ningún dato que apoye esta hipótesis, ni tampoco que la desapruebe. A diferencia de mitocondrias y plastos, los peroxisomas no contienen restos de un sistema genético independiente. Esta observación, sin embargo, es compatible con la teoría de que los peroxisomas se hayan desarrollado a partir de un endosimbionte. Las mitocondrias y los plastos han perdido la mayor parte de sus genes originales que han pasado al núcleo, y los peroxisomas primitivos podrían haber perdido todo su ADN.

Cualquiera que sea el modo de su incorporación, los peroxisomas podrían haber permitido a los eucariotas primitivos capear la crisis del oxígeno. Su distribución universal podría, pues, explicarse. La enorme ganancia que significa la recuperación de la energía proporcionada por el acoplamiento de la formación de ATP con la utilización del oxígeno justificaría la adopción subsiguiente de las mitocondrias, orgánulos que tienen la ventaja adicional de mantener el oxígeno del entorno dentro de niveles inferiores a los que los peroxisomas pueden mantener.

¿Por qué no desaparecieron los peroxisomas tras la llegada de las mitocondrias? Para cuando las células eucariotas adquirieron las mitocondrias, algunas actividades de los peroxisomas (por ejemplo, el metabolismo de ciertos ácidos grasos) debieron haber llegado a ser tan vitales, que la selección natural no pudo eliminar ya estos orgánulos primitivos. De ahí que peroxisomas y mitocondrias se

encuentren juntos en la mayoría de las células eucariotas actuales.

Los otros orgánulos fundamentales de origen endosimbiótico son los plastos, cuyos representantes principales son los cloroplastos, los orgánulos fotosintéticos verdes de las algas unicelulares y de los vegetales pluricelulares. Los plastos proceden de las cianobacterias, procariotas responsables de la crisis del oxígeno. Su adopción como endosimbiontes tuvo lugar probablemente después de la adopción de las mitocondrias. Las ventajas selectivas que instaron la adopción de endosimbiontes fotosintéticos resultan obvias. Las células que antes habían necesitado contar con un suministro constante de alimentos prosperaron sin otros ingredientes que luz, aire, agua y unos pocos minerales en disolución. En efecto, hay datos de que las células eucariotas adquirieron plastos al menos en tres momentos diferentes, dando lugar a las algas verdes, rojas y pardas. Los miembros del primero de estos grupos originaron más tarde los vegetales pluricelulares.

Lo que había comenzado en tregua incómoda se tornó pronto en una esclavización de los prisioneros endosimbióticos capturados por sus hospedadores fagocíticos. Esa sujeción se consiguió con la transferencia paulatina de la mayoría de los genes de los endosimbiontes al núcleo de la célula hospedadora. En sí misma, la captación de genes por parte del núcleo no encierra ningún misterio. Cuando penetran genes foráneos en el citoplasma de una célula (lo observamos en los experimentos de bioingeniería), pueden fácilmente aposentarse en el núcleo y realizar allí su función. Es decir, pueden replicarse durante la división celular y servir de moldes maestros para la síntesis de proteínas. Pero sí llama la atención que la migración de los genes desde los endosimbiontes hacia el núcleo parezca haber creado más problemas que resuelto dificultades. Una vez producida dicha transferencia, las proteínas codificadas por estos genes comenzaron a elaborarse en el citoplasma de la célula hospedadora (donde se construyen los productos de todos los genes nucleares). Estas moléculas debían trasladarse después al endosimbionte para cumplir su función. Pese a un rodeo tan complicado, ese proceder no sólo aguantó los embates de la evolución, sino que también se reveló de una contundente eficacia; aquellos endosimbiontes que se reservaron copias de genes transferidos acabaron desapareciendo.

Hoy día, las mitocondrias, plastos y peroxisomas reciben las proteínas sintetizadas en el citoplasma circundante con la ayuda de estructuras transportadoras complejas, que forman parte de sus membranas. Tales estructuras reconocen, en ciertas secciones de las moléculas proteicas recién sintetizadas, la "tarjeta de dirección" específica para cada orgánulo. El aparato de transporte permite entonces que las moléculas apropiadas atraviesen la membrana con la ayuda de energía y de proteínas especializadas (chaperonas). Estos sistemas que trasladan proteínas a los orgánulos podrían haberse desarrollado a partir de sistemas, semejantes, destinados a la secreción de proteínas que ya existían en las membranas originales de los endosimbiontes. En su nueva función, sin embargo, estos sistemas operarían desde el exterior hacia el interior.

La adopción de endosimbiontes desempeñó un papel crucial en el nacimiento de los eucariotas. Con todo, no fue ése el acontecimiento fundamental. Más significativo (y el que requirió asimismo un número mayor de innovaciones evolutivas) fue el largo y misterioso proceso que posibilitó tal incorporación: la lenta conversión, a través de más de mil millones de años, de un antepasado procariota en un gran microorganismo fagocítico que poseía la mayoría de los atributos de las células eucariotas modernas. La ciencia comienza a levantar el velo que envuelve esta transformación capital, sin la cual buena parte del mundo de los seres vivos, incluido el hombre, no hubiera existido.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORIGIN OF EUKARYOTE AND ARCHAEBACTERIAL CELLS. T. Cavalier-Smith en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 503, páginas 17-54; julio de 1987.

BLUEPRINT FOR A CELL: THE NATURE AND ORIGIN OF LIFE. Christian de Duve. Neil Patterson Publishers/Carolina Biological Supply Company, 1991.

TRACING THE HISTORY OF EUKARYOTIC CELLS: THE ENIGMATIC SMILE. Betsy D. Dyer y Robert A. Obar. Columbia University Press, 1994.

VITAL DUST: LIFE AS A COSMIC IMPERATIVE. Christian de Duve. Basic Books, 1995.

La búsqueda de vida en otros planetas

Que tengamos constancia, sólo hay vida en la Tierra. Pero las cosas podrían cambiar gracias a un innovador telescopio espacial

J. Roger P. Angel y Neville J. Woolf

La posibilidad de que no estemos solos en el universo ha fascinado al hombre durante siglos. A comienzos del XVII Galileo Galilei contempló el cielo nocturno a través de su telescopio recién inventado. Descubrió las montañas de la Luna y advirtió que los otros planetas eran, como la Tierra, esféricos. Algo más de media centuria después se observó que había capas de hielo polar en Marte y que la superficie de este planeta cambiaba de color, lo que atribuyeron los astrónomos de la época a los cambios de tonalidad de la vegetación con las estaciones (hoy se sabe que la causa son las tormentas de polvo). En la última parte de nuestro siglo las cámaras instaladas a bordo de naves espaciales no tripuladas tomaron imágenes de Marte donde se veían los barrancos abiertos por ríos tiempo ha desaparecidos. Así se reavivó la esperanza de que alguna vez hubiera habido vida. Pero las muestras del suelo marciano traídas, en los años setenta, por la sonda *Viking* no ofrecieron prueba material de vida alguna. Las condiciones actuales del resto de nuestro sistema solar parecen ser incompatibles con la vida tal y como la conocemos en la Tierra.

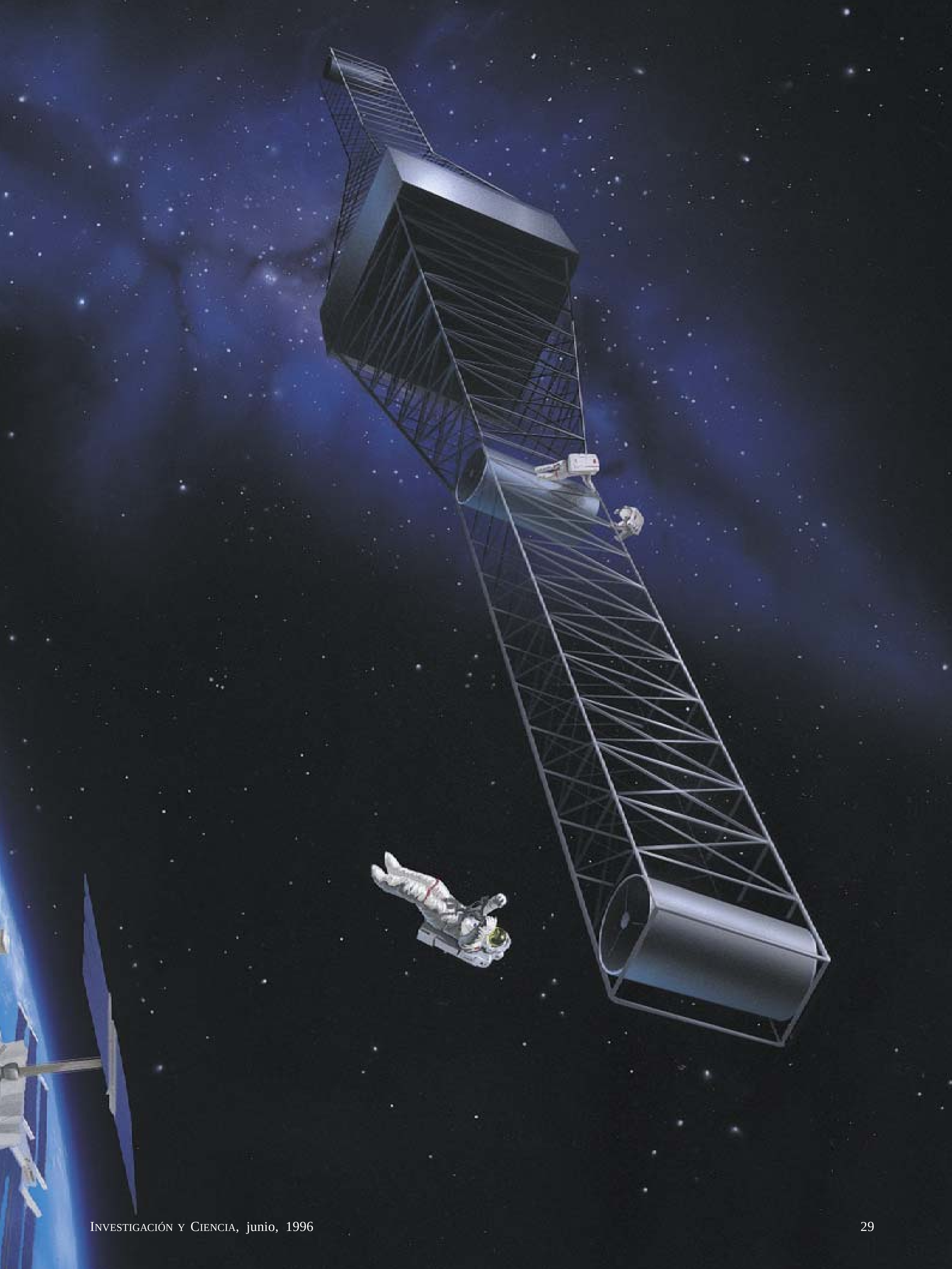
Pero la búsqueda de vida extraterrestre ha visto recientemente dilatar sus horizontes. Esa inquisición llega ahora hasta los planetas que están más allá de nuestro sistema solar. Tras años de observación se han reunido pruebas de que hay planetas en órbita alrededor de tres estrellas lejanas parecidas al Sol. En tales planetas y en otros que giren en torno a estrellas podrían haberse desarrollado seres vivos. Hallar vida extraterrestre parece un trabajo de Hércules, pero de aquí en diez años podrían construirse los instrumentos necesarios para identificar planetas que alojen formas de vida parecidas a las primitivas de la Tierra.

La capacidad del mayor y más potente telescopio instalado en el espacio, el *Telescopio Espacial Hubble*, llega hasta poder distinguir las montañas de Marte. Para tomar fotografías de pareja nitidez sobre los accidentes del relieve de los planetas que giran alrededor de otras estrellas se necesitaría una red de telescopios espaciales del tamaño de Estados Unidos. Por otro lado, como ha señalado Carl Sagan, de la Universidad de Cornell, sólo las fotografías de muy alta resolución revelan la presencia de vida en la Tierra. Se podrían obtener imágenes detalladas enviando naves espaciales autónomas a otros sistemas solares, pero está claro que la enorme distancia que separa la Tierra de cualquier planeta que haya en ellos constituye un obstáculo insalvable; las sondas tardarían milenios en llegar a su destino y transmitir imágenes útiles.

La fotografía no es, además, el mejor procedimiento para empezar a estudiar los planetas remotos. Los astrónomos recurren a la espectroscopía para recabar la mayoría de los datos.



1. ESTE SISTEMA TELESCOPICO ESPACIAL es el medio que los autores proponen para buscar planetas donde exista vida. El instrumento, un interferómetro especial de 50 a 75 metros de longitud, podría ensamblarse en la proyectada estación espacial internacional (*inferior izquierda*) y, mediante propulsión eléctrica, se le trasladaría a una órbita alrededor del Sol aproximadamente igual a la de Júpiter. En esta misión se centran los planes de la NASA encaminados a estudiar los sistemas planetarios cercanos.



Nuevos planetas que giran en torno a estrellas de tipo solar

Hasta hace poco, los astrónomos no contaban con pruebas directas que apoyaran la hipótesis de que hubiera planetas, del tipo que fuese, en órbita alrededor de estrellas que se pareciesen al Sol. Pero durante el pasado mes de octubre Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra, anunciaron la detección de un planeta de gran masa en órbita alrededor de la estrella de tipo solar 51 Pegasi. Geoffrey W. Marcy, de la Universidad estatal de San Francisco, y R. Paul Butler, de la de California en Berkeley, confirmaron el hallazgo y, tan sólo tres meses más tarde, encontraron otros dos cuerpos en órbita alrededor de estrellas similares.

Nadie ha visto en realidad estos mundos de fuera: los tres se identificaron indirectamente, midiendo su influencia en el movimiento de las estrellas progenitoras. Conforme un objeto celeste gira en torno a una estrella su fuerza gravitatoria provoca que ésta oscile hacia adelante y hacia atrás, lo que produce un desplazamiento periódico, el efecto Doppler, en el espectro de la estrella tal como se ve desde la Tierra. El patrón de ese corrimiento revela el tamaño y la forma de la órbita del compañero de la estrella; la magnitud del corrimiento señala su masa mínima posible. La técnica Doppler no permite discernir la temperatura, ni la composición química del objeto, ni cualquier otra propiedad de esa índole.

Pese a tan limitada información, queda claro que estos nuevos planetas no se parecen a ningún objeto que hayamos visto antes. El que gira alrededor de 51 Pegasi es el más extraño de los tres. Su masa es, por lo menos, la mitad de la masa de Júpiter y, sin embargo, orbita a tan sólo siete millones de kilómetros de distancia de la estrella, es decir, menos de un octavo del intervalo que separa a Mercurio del Sol. Con esa proximidad la superficie del planeta debe, en teoría, cocerse a una temperatura de 1300 grados Celsius. El período orbital del planeta, o año, es de tan sólo 4,2 días.

Uno de los planetas identificados por Marcy y Butler gira alrededor de la estrella 47 Ursae Majoris y sus propiedades son un poco menos extremas. Su órbita de tres años describe una trayectoria circular a unos 300 millones de kilómetros de su estrella (lo que viene a ser como una órbita entre Marte y Júpiter), y su masa es al menos 2,3 veces superior a la de Júpiter; en nuestro propio sistema solar no parecería demasiado fuera de lugar.

El tercer cuerpo recién encontrado, también detectado por Marcy y Butler, orbita en torno a la estrella 70 Virginis. Este “planeta” difiere bastante de los otros dos. Es el más pesado del grupo, con una masa al menos 6,5 veces superior a la de Júpiter; su órbita de 117 días es muy elíptica. Marcy ha asegurado que se encuentra en la “zona ideal”, el intervalo de distancias en que la temperatura de un planeta es “justo la que tiene que ser” para que pueda darse agua en estado líquido. Pese a tan optimista afirmación, este planeta gigante seguramente tiene una atmósfera profunda y sofocante que ofrece escasas posibilidades a la vida. En realidad, por su enorme masa y su órbita elíptica, numerosos científicos sostienen que el compañero de 70 Virginis no debería considerarse planeta sino enana marrón, un objeto gaseoso que se forma de manera hasta cierto punto similar a una estrella, pero que carece de la masa necesaria para brillar.

Hay una razón por la que los astrónomos sólo hallan cuerpos de elevada masa que describen órbitas de corto período: porque son los que menos cuesta detectar mediante la técnica Doppler. El descubrimiento de un planeta en una órbita lenta análoga a la de Júpiter requeriría al menos una década de observaciones Doppler de alta precisión. Una posible vía para ampliar la búsqueda sería recurrir a las lentes gravitatorias, mecanismo en virtud del cual la fuerza gravitatoria de una estrella intensifica transitoriamente la luz procedente de otra estrella más lejana. Si la estrella interpuesta que actúa como lente tuviera planetas, éstos producirían aumentos adicionales de corta duración del brillo. Como nos es dado seguir mu-

La espectroscopía analiza la luz emitida por los cuerpos celestes y extrae de ella las signaturas distintivas de su temperatura, la presión atmosférica y composición química.

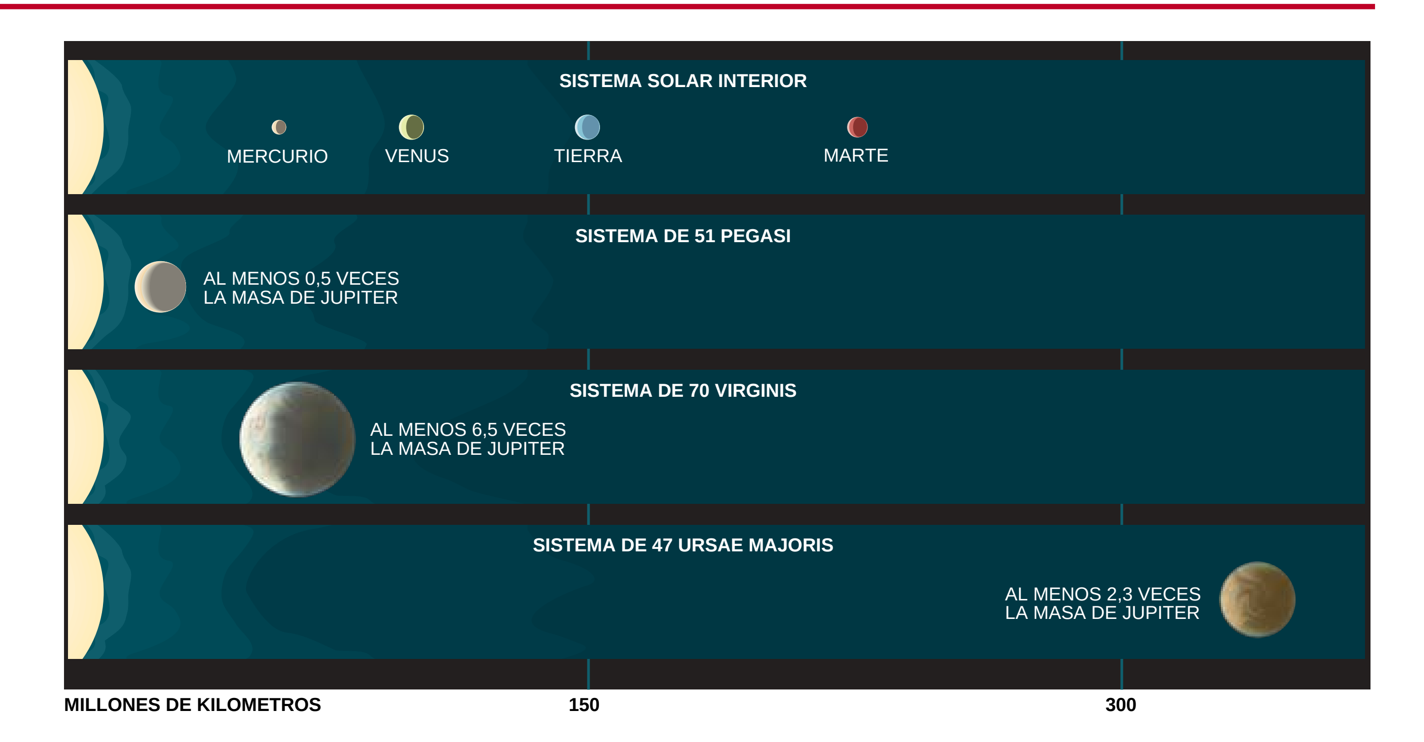
Los signos de existencia de vida que la espectroscopía identificaría con mayor facilidad serían las señales de radio que emitiesen unos extraterrestres para comunicarse a través del espacio interestelar. Tales transmisiones no se parecerían en nada a los fenómenos naturales; su peculiaridad es un ejemplo del tipo de balizas celestes que debemos buscar para encontrar vida inteligente en el cosmos. Hasta ahora los barridos sensibles de los sistemas estelares lejanos no han dado con señal alguna, lo que sólo quiere decir que no abundan los extraterrestres que se comunican interestelarmente por radio.

Los planetas podrían albergar formas de vida que no se comuniquen. Hemos, pues, de poder hallar indicios incluso de los organismos más elementales. Para aumentar nuestra capacidad de localizar planetas distantes y determinar si tales mundos están o no habitados hemos propuesto el diseño de un potente y novedoso heredero del telescopio de Galileo que, creemos, nos facilitará la detección de vida en otros planetas.

Las formas de vida más elementales de nuestro planeta alteraron las condiciones de existencia de un modo que habría sido perceptible para un observador distante. Del registro fósil se desprende que en los mil millones de años subsiguientes a la formación de la Tierra, en cuanto cesó el bombardeo de asteroides, se propagaron por el globo bacterias, cianofíceas y otros organismos primitivos. Durante los dos mil millones de años siguientes no hubo otra forma de vida sobre la Tierra; por tanto, si hay vida en otros planetas, podría tener esa forma incapaz de comunicarse.

Las humildes cianofíceas de la Tierra no manejan transmisores de radio, pero son magníficos ingenieros químicos. A medida que las cianofíceas se fueron multiplicando comenzaron a liberar grandes cantidades de oxígeno hacia la atmósfera. La producción de oxígeno es fundamental para la vida basada en el carbono: los organismos elementales se nutren de agua, nitrógeno y dióxido de carbono y expulsan oxígeno a la atmósfera. El oxígeno es un gas químicamente reactivo; si no se mantuviera una reposición constante por las cianofíceas y —en una etapa posterior de la evolución de la Tierra— por las plantas, disminuiría su concentración. Por tanto, la presencia abundante de oxígeno en la atmósfera de un planeta constituye el primer indicador de que en él podría haber vida basada en el carbono.

El oxígeno deja un rastro inconfundible en la radiación emitida por un planeta. Parte de la luz solar, por ejemplo, que llega a la superficie de la Tierra se refleja a través de la atmósfera y vuelve al espacio. El



chas estrellas al mismo tiempo, se podrían obtener de esa manera estadísticas acerca de la abundancia de planetas. Por desgracia, este método no sirve para detectar planetas alrededor de estrellas cercanas.

Otra posibilidad consiste en la búsqueda directa de la radiación reflejada por los planetas gigantes en torno a otras estrellas. Normalmente la atmósfera de la Tierra desdibujaría por completo la estrella y el planeta, y los confundiría. La óptica adaptativa (un método para anular la distorsión atmosférica) podría resolver este problema. Un sistema de óptica adaptativa diseñado por J. Roger P. Angel y mejorado por David Sandler y Steve Stahl, de la compañía Thermotrex de San Diego, captaría, en teoría, la imagen de un planeta gigante a la distancia orbital de Júpiter en una sola noche de observación.

Los planetas recién descubiertos suponen tan sólo la punta del iceberg. La observación continua, el análisis cuidadoso de los datos y la aplicación de técnicas innovadoras como, por ejemplo, el interferómetro espacial pronto abrirán las puertas a muchos más hallazgos y nos proporcionarán un mejor conocimiento de la verdadera diversidad de los mundos.

Corey S. Powell

oxígeno de la atmósfera absorbe parte de esa radiación; quien observase la Tierra mediante la técnica espectroscópica identificaría, pues, en la luz solar refleja la marca característica del oxígeno.

En 1980 Toby C. Owen sugirió que se buscase la señal de oxígeno en la luz roja visible reflejada por los planetas como signo de la existencia de vida en ellos. Más recientemente, Sagan informó en 1993 que la sonda espacial *Galileo* había registrado la señal característica del oxígeno en la parte roja del espectro de la luz visible procedente de la Tierra. Este indicador de la existencia de vida ha estado radiando al espacio una señal reconocible durante los últimos 500 millones de años, por lo menos.

Claro está que podría existir una fuente no biológica de oxígeno en un planeta carente de vida; siempre debe explorarse tal posibilidad. Además, la vida podría basarse en algún otro tipo de química que, a diferencia de la vida basada en el carbono, no produjera oxígeno. Pero existen poderosas razones para creer que la vida tendría en otros planetas una naturaleza química similar a la que manifiesta en el nuestro. El carbono es especialmente adecuado como ladrillo esencial de la vida; amén de abundar en el universo, ningún otro elemento conocido puede formar la miríada de moléculas complejas, aunque estables, que la vida tal como la conocemos requiere.

Es obvio que nuestro planeta, rico en agua, resulta idóneo para la aparición de la vida. El agua proporciona un solvente para que se produzcan las reacciones bioquímicas que posibilitan la aparición de la vida y sirve de fuente del hidrógeno que necesita la materia viva. Los planetas que se parezcan a la Tierra, por su tamaño y por la distancia que los separe de su sol, son los hogares más verosímiles en otros sistemas solares de la vida basada en el carbono, sobre todo porque podrían tener agua en estado líquido. La distancia que media entre un planeta y su estrella determina la temperatura de aquél, es decir, si será demasiado elevada o demasiado baja para que haya agua en estado líquido.

No es difícil calcular la órbita ideal, esto es, la distancia donde las condiciones son "justo las que tienen que ser" para que se genere y sustente la vida tal y como existe en la Tierra. Si la estrella fuese grande y caliente, unas 25 veces más brillante que el Sol, un hipotético planeta similar a la Tierra estaría de ella a la misma distancia, aproximadamente, que Júpiter del Sol. En el caso de una estrella pequeña y fría, cuya luminosidad fuera una décima parte del brillo solar, la órbita planetaria seguiría una trayectoria similar a la que describe Mercurio.

Pero de poco sirve una localización correcta si la fuerza de gravedad del planeta no consigue retener sus océanos y su atmósfera. Si la dis-

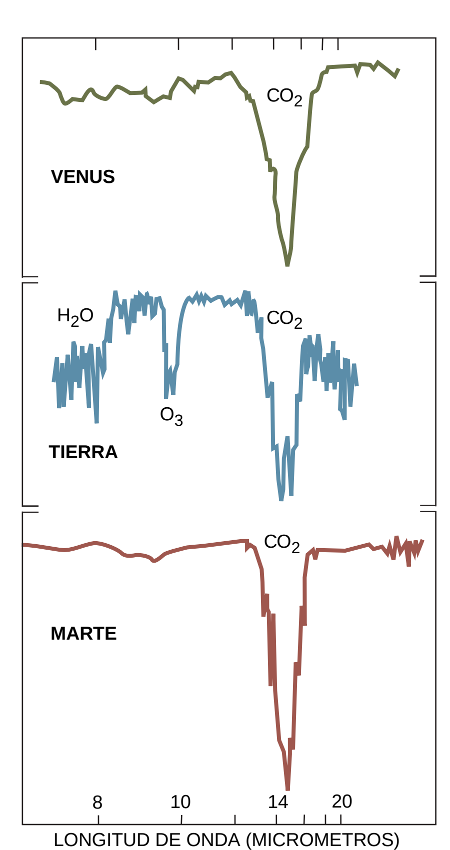
tancia a una estrella fuera el único factor a tomar en consideración, la Luna tendría agua en estado líquido. Pero la gravedad depende del tamaño y la densidad del cuerpo: como la Luna es menor y menos densa que la Tierra, su fuerza de gravedad es también mucho menor. Si se formaran capas atmosféricas o agua sobre un cuerpo de estas características, pronto se perderían en el espacio.

Por contra, un planeta de gran tamaño, con una intensa fuerza de gravedad, atraerá gases del espacio. Se cree que Júpiter se desarrolló así, acumulando poco a poco un enorme caparazón externo de hidrógeno y helio. Es poco probable que la vida, tal como la conocemos, exista en planetas gigantes y gaseosos del estilo de Júpiter.

Aunque disponemos de una descripción bastante precisa del tipo de planeta que podría acoger la vida, está comprobado que encontrar un objeto, *el que sea*, girando alrededor de una estrella lejana es una tarea formidable. Los mejores métodos actuales para detectarlos suponen la observación, no de los propios planetas, sino de sus estrellas. Los astrónomos están pendientes de pequeñas variaciones en la órbita de una estrella o en su emisión de luz que no puedan explicarse sino por la presencia de planetas a su alrededor. Pero la observación indirecta de los planetas nos dice muy poco acerca de sus características. De hecho, las técnicas indirectas revelan tan sólo la masa del cuerpo y su posición; es imposible discernir sólo con esos datos si alberga o no habitantes.

Necesitamos, pues, una técnica diferente para descubrir qué elementos químicos hay en un planeta y otras peculiaridades de similar especificidad. Mencionamos antes que la radiación visible procedente de un planeta puede confirmar la presencia de ciertas moléculas —el oxígeno en particular— que sabemos sirven de base a la vida. Pero el distinguir las débiles señales del oxígeno en la luz reflejada por un pequeño planeta que gira alrededor de una estrella, incluso en nuestras inmediaciones solares, sería una empresa muy ardua.

El brillo del sol de un planeta distante, por ejemplo, superaría la luminosidad del planeta en cuestión en 10.000 millones de veces. Ello significa que la caza de planetas viene a ser como buscar una luciérnaga junto a un reflector, y ambos a miles de kilómetros de distancia. Aun cuando lográramos separar la luz reflejada por un planeta, cualquier señal de oxígeno en el espectro sería débil y costaría mucho detectarla.



2. LA MARCA infrarroja de la vida sólo se puede ver en la Tierra. Aunque Venus y Marte tienen también atmósferas ricas en dióxido de carbono (CO_2), sólo la Tierra abunda en agua (H_2O) y ozono (O_3), una forma de oxígeno presente a grandes alturas en la atmósfera. El agua es un ingrediente fundamental para el mantenimiento de la vida basada en el carbono, de cuya realidad el oxígeno constituye un indicador. La radiación infrarroja que emitiese algún planeta de un sistema solar distante revelaría quizá la existencia de un mundo similar al nuestro.

Ante tamaña dificultad, propusimos, en 1986, junto con Andrew Y. S. Cheng, hoy en la Universidad de Hong Kong, que un método más adecuado para encontrar planetas y buscar vida extraterrestre sería el seguimiento de las longitudes de onda del infrarrojo medio (más largas que la longitud de onda de la luz roja visible) emitidas por los planetas. Este tipo de radiación —en realidad el calor que irradia el planeta— tiene una longitud de onda de diez a veinte veces más larga que la de la luz visible. A esas longitudes de onda un planeta emite casi 40 veces más fotones —partículas de luz— que a longitudes de onda más cortas, y la estrella cercana sería "sólo" un millón de veces más brillante que el planeta, una proporción mil veces más favorable que la ofrecida por la luz roja.

Además, hay tres compuestos que aparecerían juntos en los planetas habitados; a saber, el ozono (una forma de oxígeno presente a grandes altitudes en la atmósfera), el dióxido de carbono y el agua, que se identifican fácilmente cuando se examina el espectro infrarrojo. De nuevo, nuestro sistema solar corrobora que se trata de una técnica prometedora: un examen de las emisiones en infrarrojo de sus planetas señala que sólo la Tierra muestra la marca infrarroja de la vida [*véase la figura 2*]. Pese a que la atmósfera de Marte y la de Venus contienen también dióxido de carbono, la Tierra es la única que muestra el rasgo espectral correspondiente a una abundancia de agua y ozono.

¿Qué tipo de telescopio se necesitaría para localizar planetas semejantes a la Tierra y captar sus emisiones infrarrojas? Algunos telescopios terrestres actuales pueden detectar la fuerte radiación infrarroja que emana de las estrellas. Pero el calor que emiten nuestra atmósfera y el propio telescopio ahogaría cualquier señal de un planeta. Ni siquiera la Antártida es lo bastante fría como para permitirnos recoger una imagen tan débil: habría que enfriar el telescopio a 225 grados centígrados bajo cero (unos 50 grados Kelvin), por lo menos. Peor aún es el hecho de que la radiación que atraviesa la atmósfera de la Tierra lleve impresas las mismas marcas espectrales del ozono, el dióxido de carbono y el agua que deseamos encontrar en otros planetas. Era obvio, razonamos, que tendríamos que trasladar el telescopio al espacio.

Aun así, para separar la radiación de un planeta de la procedente de su estrella un telescopio tradicional tendría que superar con creces el tamaño de los telescopios terrestres o espaciales construidos hasta la fecha. Debido a que la luz no se puede enfocar a un punto más pequeño que su propia longitud de onda, la luz procedente de una zona celeste muy alejada podría enfocarse, en el mejor de los casos, a un núcleo borroso rodeado por un débil halo. Ni siquiera un espejo de telescopio perfecto es capaz de crear imágenes perfectas. Si el halo que rodea a la estrella se extiende más allá de la órbita del planeta, no podremos discernir en su

interior el cuerpo mucho más oscuro de éste. Si dispusiéramos de un espejo de telescopio y su imagen correspondiente muy grandes, podríamos, en principio, conseguir que la imagen de una estrella fuese todo lo nítida que quisiéramos. Mas, para alcanzar una gran resolución, el tamaño de los instrumentos habría de ser tal que el proyecto resultaría inviable.

Es posible predecir las prestaciones de los telescopios y determinar de antemano qué calidad de imagen cabe esperar. Para observar el espectro infrarrojo de un planeta similar a la Tierra que girase alrededor de una estrella situada a, digamos, 30 años luz, nos haría falta un enorme telescopio espacial, de cerca de 60 metros de diámetro. Con la técnica disponible, el costo de un instrumento de esas características sería comparable a la deuda norteamericana.

Sabíamos que, para desarrollar un telescopio de dimensiones más razonables que nos permitiera localizar planetas pequeños, habitables quizá, tendríamos que hacer ciertos trucos con nuestros instrumentos. Ronald N. Bracewell, de la Universidad de Stanford, ideó hace 23 años una estratagema útil. Enseñó cómo podrían adaptarse dos telescopios pequeños para buscar planetas grandes y fríos parecidos a Júpiter. El instrumento que propuso constaba de dos telescopios de un metro de diámetro cada uno, separados veinte metros. Cada uno de ellos producía por sí solo imágenes borrosas en las que Bracewell jamás habría podido distinguir las débiles imágenes de los planetas. Pero, juntos, podían configurarse de suerte tal que permitieran observar mundos lejanos.

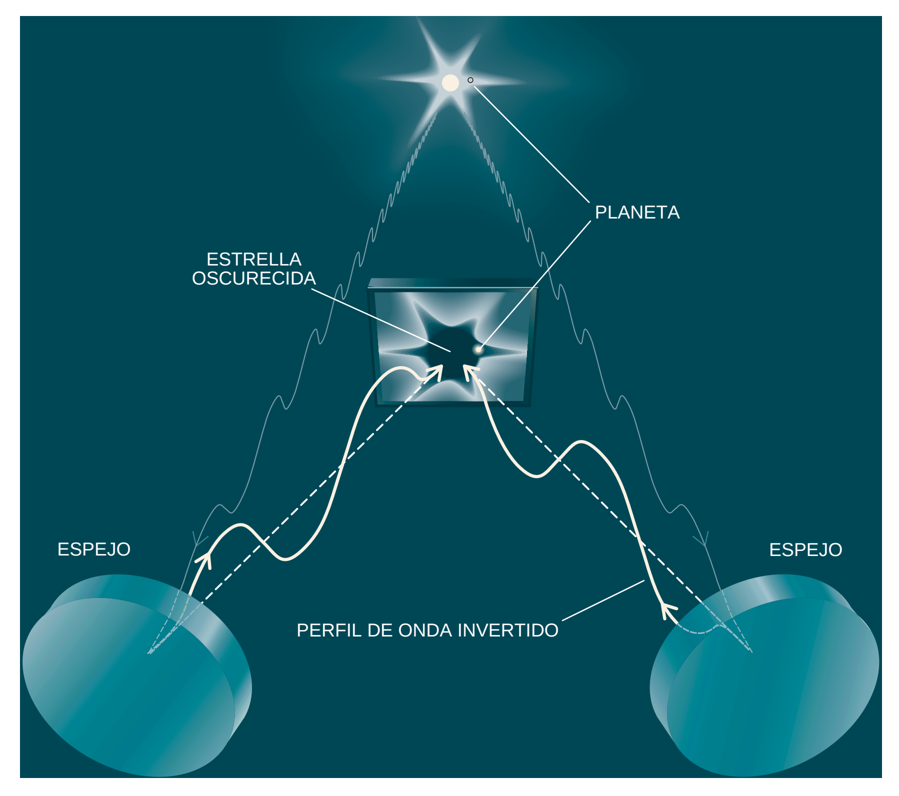
Bracewell pensó que, si apuntaba ambos telescopios hacia la misma estrella, podría invertir la luz de uno de ellos, convirtiendo los picos de sus ondas en valles y viceversa. Combinaría luego la luz invertida con luz procedente del segundo telescopio. Como la primera imagen sería la contraria de la segunda, al combinar las dos de manera que se solaparan exactamente la luz de la estrella —tanto el núcleo central como el halo circundante— se anularía. (Naturalmente, la luz no desaparecería, ya que la energía tiene que conservarse: la luz procedente de la estrella se desviaría a una zona distinta del telescopio.) Se llama “interferómetro” a este tipo de dispositivo porque revela datos sobre una fuente de luz mediante la interferencia de las ondas del emisor.

El interferómetro diseñado por Bracewell sólo oscurece una estrella si ésta es perpendicular a la línea que une los centros de los telescopios. Dispuestos así, ambos telescopios reciben de la estrella exactamente el mismo patrón de ondas de luz. Si barriéramos con el instrumento el cielo, parecería que las estrellas, a medida que entrasen y saliesen de la línea, parpadean.

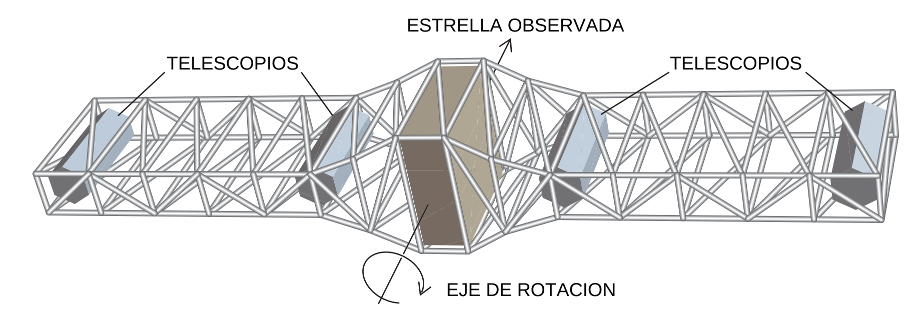
Pero un planeta, por pequeña que sea la distancia que lo separe de la estrella, no se alineará con el dispositivo a la vez que ésta. Los dos telescopios registrarán la señal del planeta en momentos ligeramente distintos, por cuya razón las ondas de luz procedente del planeta no se anularán entre sí. Pero si entra luz en el interferómetro después de que hayamos anulado la imagen de la estrella, sabremos que existe una fuente adicional de radiación infrarroja cerca de ella, un planeta quizá. Podremos analizar esa señal girando el interferómetro alrededor de la línea que une el instrumento y la estrella. La intensidad de la imagen variará a medida que el dispositivo rote. Un planeta generaría un patrón de variación reconocible [*véase la figura 4*].

J. ROGER P. ANGEL y NEVILLE J. WOOLF, del Observatorio Steward de la Universidad de Arizona, han colaborado durante los últimos quince años en la obtención de nuevos métodos para la construcción de mejores telescopios. Angel, miembro de la Regia Sociedad de Londres, dirige el laboratorio de espejos del Observatorio Steward. Woolf ha creado técnicas que minimizan la distorsión de las imágenes causada por la atmósfera. Angel y Woolf consideran que la búsqueda de planetas lejanos es la prueba de fuego de los diseñadores de telescopios.

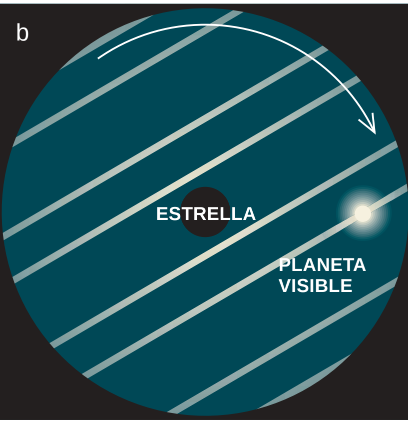
Tras elaborar el diseño de este interferómetro, Bracewell se percató de que el obstáculo principal para localizar un planeta similar a Júpiter no sería la abrumadora luz procedente de una estrella cercana, sino el calor radiado por las partículas de polvo de nuestro sistema solar, o luz zodiacal. La débil señal procedente de un planeta distante sería prácticamente imperceptible en ese brillo de fondo. Para tener alguna

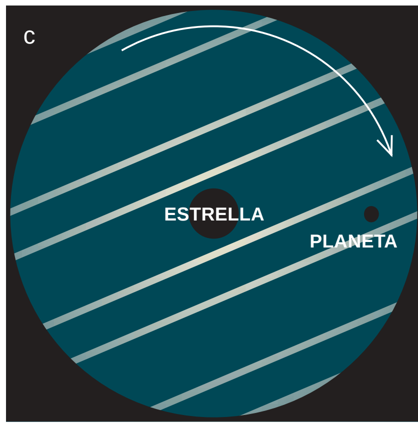


3. ANULANDO LA LUZ ESTELAR pueden observarse los planetas, poco brillantes, que el resplandor estelar oculta. Dos telescopios apuntados hacia una misma estrella (*arriba*) anulan gran parte de su luz: uno de los telescopios invierte la luz —convirtiendo los picos de sus ondas en valles y viceversa (*derecha*). La combinación de la luz invertida con la luz estelar no invertida captada por el segundo telescopio (*izquierda*) hace que interfieran las ondas luminosas entre sí; la imagen de la estrella desaparece (*centro*).



4. UN INTERFEROMETRO rotatorio podría desvelar la existencia de un planeta alrededor de una estrella distante. Los cuatro telescopios dispuestos como se aprecia en la ilustración superior —que muestra el instrumento propuesto por los autores— proporcionarían una visión compuesta del cielo, parcialmente oscurecida por numerosas bandas; la estrella que se ha de oscurecer estaría oculta tras una de ellas. A medida que el instrumento rotase alrededor de la línea que conecta el eje del dispositivo con la estrella también girarían las bandas oscuras. Un planeta cercano entraría y saldría de las bandas (*dibujos a-c*). El análisis del patrón que seguirían esos parpadeos determinaría la distancia entre el planeta y la estrella.





esperanza de descubrir un planeta habría que calcular, a fin de ver a través de ese fondo incandescente, el promedio de los datos que se tomaran a lo largo de al menos un mes.

Nosotros nos encontramos, además, con otro problema al intentar adaptar el diseño de Bracewell a la búsqueda de planetas que giren más cerca de un sol y sean más pequeños que Júpiter. No existe interferómetro capaz de anular perfectamente la luz procedente de las estrellas; la zona oscurecida es pequeña, la luz de la estrella siempre consigue deslizarse por los bordes y cualquier exceso de luz se convierte en un obstáculo importante cuando intentamos ver planetas pequeños y de luz muy débil, como la Tierra.

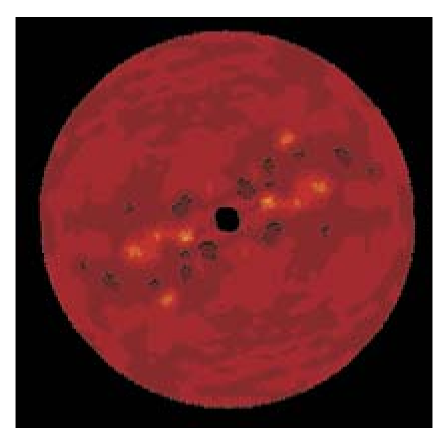
Para superar tales limitaciones una serie de investigadores, nosotros entre ellos, ha ideado otras estrategias. Uno de nosotros (Angel) apuntó en 1990 que, disponiendo cuatro espejos en forma de diamante, se conseguiría anular mejor la luz de las estrellas. Ahora bien, para suprimir el brillo de fondo de la luz zodiacal cada telescopio tendría que medir ocho metros de diámetro. Alain Léger y sus colaboradores, de la Universidad de París, aportaron la primera solución práctica a esta dificultad. Propusieron la colocación del dispositivo en órbita alrededor del Sol, a la distancia aproximada de la órbita de Júpiter. Los telescopios se enfriarían así hasta una temperatura adecuada y se minimizaría el resplandor de la luz zodiacal. Gracias a esta atenuación del brillo de fondo, el interferómetro orbital podría ser relativamente pequeño; sería posible construir un instrumento sensible con cuatro telescopios de tan sólo un metro de diámetro. Pero este instrumento presentaría un inconveniente importante: anularía con tanta eficacia la luz de la estrella que a veces también ocultaría los planetas de su entorno.

Así quedó el asunto hasta 1995, cuando la NASA pidió a los investigadores una guía cartográfica para orientarse en la exploración de otros sistemas solares. La NASA seleccionó tres equipos para que estudiaran varios métodos de detección de planetas en órbita alrededor de las estrellas. Constituimos un equipo con Bracewell, Léger y su compañero Jean-Marie Mariotti, del Observatorio de París, y una veintena de científicos e ingenieros. Nosotros dos hemos estudiado en la Universidad de Arizona la potencia de un método nuevo. Hemos diseñado un interferómetro con dos pares de espejos dispuestos en línea recta. Cada par oscurecerá la imagen principal de la estrella al tiempo que anulará, en gran parte, la fuga de luz estelar del otro par.

Como este tipo de interferómetros suprime muy bien la luz, se les puede dar una longitud considerable, de unos 50 a 75 metros. El tamaño del instrumento ofrece una ventaja importante: con esta configuración las señales procedentes de otros planetas son complejas y únicas. Mediante un análisis adecuado, los datos del interferómetro sirven para reconstruir la imagen de un sistema solar distante [*véase la figura 5*]. Tal como nosotros lo concebimos, el interferómetro orbital apuntaría hacia una estrella diferente cada día, pero volvería a los sistemas interesantes para observarlos más detenidamente.

Si lo apuntáramos hacia nuestro sistema solar desde una estrella cercana, el interferómetro detectaría Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Y los datos podrían analizarse para determinar la composición química de la atmósfera de cada uno de ellos. El dispositivo no tendría dificultad alguna en estudiar desde nuestro sistema solar el planeta recién descubierto alrededor de 47 Ursae Majoris. Y, sobre todo, el interferómetro podría identificar planetas similares a la Tierra que de otro modo eludirían la detección y comprobaría la presencia en ellos de dióxido de carbono, agua y ozono.

La construcción de un instrumento de estas características sería una empresa de una magnitud notable, un proyecto internacional quizás; además, muchos detalles están aún por ultimar. Calculamos que el interferómetro propuesto costará algo menos de dos mil millones de dólares —aproximadamente un 10 % del presupuesto que la NASA dedicará a la investigación



5. ESTA IMAGEN de unos planetas distantes, creada a partir de unas señales interferométricas simuladas, muestra qué cabe esperar razonablemente que se vea con un telescopio espacial. El estudio enseña un sistema situado a unos 30 años luz con cuatro planetas, de una luminosidad parecida a la de la Tierra. (Cada planeta aparece duplicado, reflejado especularmente con respecto a la posición de la estrella.) Los autores suponen que, con esta sensibilidad, el instrumento observaría fácilmente el planeta encontrado hace poco en órbita alrededor de 47 Ursae Majoris.

espacial durante los próximos diez años. Cabe sostener que el descubrimiento de vida en otros planetas sería el logro supremo de la exploración del espacio. El administrador de la NASA, Daniel S. Goldin, ha dicho que el hallazgo de vida en otros mundos "lo cambiaría todo: ningún esfuerzo, ningún pensamiento humano permanecería inalterado tras ese descubrimiento".

Es admirable que tengamos al alcance de la mano la técnica necesaria para realizar ese descubrimiento. Dentro de poco deberíamos estar en condiciones de responder un interrogante con siglos de antigüedad: ¿sólo hay vida en la Tierra?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A SPACE TELESCOPE FOR INFRARED SPECTROSCOPY OF EARTHLIKE PLANETS. J. R. P. Angel, A. Y. S. Cheng y N. J. Woolf en *Nature*, vol. 322, págs. 341-343; 24 de julio 1986.

USE OF A 16 METER TELESCOPE TO DETECT EARTHLIKE PLANETS. J. Roger P. Angel en *The Next Generation Space Telescope*. Dirigido por P. Bely y C. J. Burrows. Instituto Científico del Telescopio Espacial, Baltimore, 1990.

LA VIDA EN EL UNIVERSO. Número extraordinario de *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1994.

Perfiles

Madhusree Mukerjee

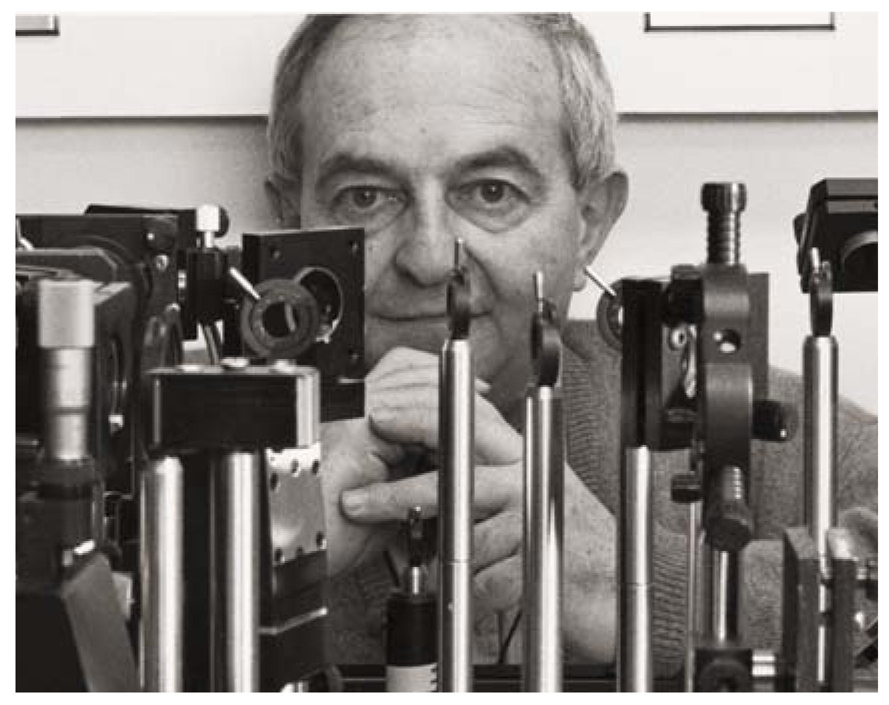
ALBERT LIBCHABER: *El mundo en un copo de nieve*

Cuando me encontré por primera vez con Albert Libchaber, hace unos 10 años, en la Universidad de Chicago, no sabía que era una celebridad. El aroma de su pipa anunciaba su presencia en los edificios de investigación, lo que me permitía a mí, que era una estudiante de doctorado, acecharle con preguntas sobre los vórtices y los anillos de humo. Me respondía con suma precisión y detalle, con movimientos ilustrativos de sus manos y de su pipa. En el piso de abajo, sus laboratorios estaban llenos de toda clase de curiosidades: cristales líquidos de colores, burbujas magnéticas pulsantes o largos dedos de aceite que se abrían camino en el agua.

Nació en París, en 1934, hijo de inmigrantes judíos polacos. Tenía seis años cuando los alemanes invadieron Francia. Sus padres, a quienes delataba un fuerte acento, decidieron que Albert y Marcel, su hermano mayor, tendrían más probabilidades de sobrevivir por su cuenta. Haciéndose pasar por dos huérfanos católicos de Alsacia, los hermanos vivieron durante la guerra en el sur de Francia. "Estamos vivos gracias a que algunos franceses nos ayudaron", reconoce Libchaber. Aun así, los muchachos vivían en la permanente angustia de ser descubiertos: de que les sorprendieran hablando de sus cuitas o de que se supiera que estaban circuncidados.

Tras cuatro años escondidos, llegaron los americanos. Los hermanos se reunieron con sus padres, que se las arreglaron para sobrevivir a la guerra. Marcel estaba contento. Pero Albert lloraba, y se negaba a ir con ellos: ya no les conocía. Tal como estaban las cosas, el matrimonio tenía bastante. "Mi madre había perdido a toda su familia, mi padre al 90 por ciento. Cuando la gente dice que los campos de concentración no existieron, yo les puedo enseñar una larga lista de tías, primos..."

El elevado balance de parientes desaparecidos le hizo comprender a Albert lo que significaba ser judío. Pero la niñez le dejó también huella. "Me enseñó a ir de un sitio a otro con facilidad", remarca, con una ligera y triste mueca. "América, Francia, no son mi hogar. Soy un judío errante."



Albert Libchaber y sus experimentos han desvelado los secretos del caos

Su padre, Chil Libchaber, era hijo de rabino. Dotado de un gran amor por los libros, estudiaba por las noches tras volver del trabajo en el París de la postguerra. "Mi padre decía: "o estudiáis u os ponéis a trabajar, no hay otra salida", cuenta riéndose. Aunque cautivado por la vida de la urbe, el adolescente Albert absorbió esta pasión por el estudio, inventando su propia mezcla. "Soy judío y francés. Francés [significa] racional, matemático. Judío, una visión mística del estudio y del aprendizaje." Lo que hacen los científicos y los maestros del Talmud, afirma, no es muy diferente: "Hay un mensaje en clave, [se trata] de descifrar la clave".

A los 20 años se caso con Irene Gellman. Aunque el matrimonio fue feliz, el papel y el lápiz no eran suficientes para satisfacer su intelecto. "Sentía la necesidad de comprobar las cosas." Se enamoró de los nuevos y excitantes dispositivos electrónicos (transistores, amplificadores, diodos, láseres) que iban apareciendo. Una beca Fullbright le llevó a la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign para estudiar con John Bardeen, el genio de la física del estado sólido. Libchaber, habituado a las jerárquicas maneras de la universidad francesa, se quedó estupefacto con Bardeen. "Aunque había recibido ya el premio Nobel, la puerta de su despacho estaba siempre abierta. Podía verlo siempre que quería."

Pasado un año y medio, fue llamado a filas y enviado al Sahara para luchar en una nueva guerra, la que libraban los franceses contra los argelinos sedientos de independencia. Asignado al escuadrón de armas atómicas, Libchaber tuvo que ir al "punto cero" un día después de la explosión para medir la radiactividad y deducir la energía liberada. El ambiente extremo del desierto hizo que esta tarea fuera un reto aún mayor. "Aprendí de la manera más dura la ciencia experimental."

Tras la guerra, Libchaber volvió a París, donde le esperaba un hijo recién nacido, para finalizar su doctorado con Pierre Aigrain, en la Escuela Normal. Allí llevó a cabo un experimento relevante. La radiación no atraviesa

habitualmente los metales; Libchaber demostró cómo un campo magnético podía crear ondas helicoidales que a pesar de todo penetraban en los metales con facilidad. Repartiendo su tiempo entre New Jersey y París, empezó a trabajar con C. C. Grimes, de los Laboratorios Bell, en diversos problemas referentes a los metales y los semiconductores.

A mediados de los setenta, Libchaber, que entonces encabezaba su propio grupo de investigación en la Escuela Normal, centró su atención sobre la transición a la turbulencia. Decidió estudiar un vórtice o dos, aislados. Junto con un ingeniero, Jean Maurer, construyó una pequeña celda de metal, de tres milímetros de anchura y 1,25 milímetros de altura. El líquido que empleó fue helio superfluido. Cuando se calienta desde abajo, el helio asciende por el centro de la celda y desciende por las paredes, formando dos rollos paralelos. La diferencia de temperaturas entre el fondo y la parte de arriba de la celda es la que pone en movimiento el fluido y la que establece su velocidad.

Conforme se aumenta la diferencia de temperatura, el flujo se desestabiliza y empieza a oscilar cada vez más. Con unas sondas se registraba la temperatura del fluido en un punto determinado. Los datos obtenidos fueron sorprendentes: las oscilaciones que iban apareciendo sucesivamente tenían una longitud de onda que era exactamente el doble de la precedente. El gráfico de Libchaber, lleno de picos que marcaban las frecuencias de las oscilaciones, llegó a manos de Mitchel J. Feigenbaum, que ahora está en la Universidad Rockefeller. A los pocos meses el teórico escribió al experimental. El experimento había puesto de manifiesto la primera ruta hacia el caos, denominada hoy "la cascada de desdoblamiento de período".

Hasta entonces, el caos había sido una mera curiosidad, un juego de matemáticos. "Desde que Libchaber hizo su experimento, y el caos se puso de manifiesto en algo real, un fluido nada menos, la mentalidad [de los físicos] cambió por completo", declara Feigenbaum. Los físicos pensaban que, conforme un sistema se vuelve desordenado, aparecen oscilaciones de longitudes de onda arbitrarias. En vez de eso, lo que ocurre es algo extremadamente preciso y ordenado (en el experimento de Libchaber aparecieron sólo los subarmónicos de una frecuencia fundamental). La elegancia del experimento realizado con helio fue la pieza clave de su éxito: un estudio comparable con agua hubiera requerido un recipiente demasiado grande para poder controlarlo.

A pesar de este logro, Libchaber no se daba descanso en la Escuela Normal. Cuando Leo P. Kadanoff, un brillante teórico de la Universidad de Chicago, visitó la Escuela Normal para reclutar estudiantes, Libchaber mismo se ofreció, medio en broma: "Yo también podría ir." El traslado, en 1983, comenzó con una fructífera "interacción fuerte" con Kadanoff. "Intercambiábamos ideas", recuerda el teórico americano. "De las ideas fluían las inspiraciones para los experimentos, y de los experimentos, nuevas ideas."

En Chicago, Libchaber puso de manifiesto una segunda ruta hacia el caos. Thomas Halsey, entonces profesor ayudante, describe cómo Libchaber entró en su despacho a las once de la noche de un viernes para anunciarle que —tras meses de esfuerzo— su proyecto estaba finalmente dando resultado. "Ese experimento era tan bello, que acabó con el tema", estima Halsey. Con un detalle exquisito y exhaustivo sacó a la luz la ruta hacia el caos por la cuasiperiodicidad, en la cual las nuevas oscilaciones no son subarmónicos sino que tienen longitudes de onda relacionadas a través del número 1,618, es decir, la razón áurea.

La vida avanza por ensayo y error. No hay un plan, sólo evolución.

Continuó estudiando la turbulencia completamente desarrollada. El caos es tan sólo un primer paso hacia el desorden, involucrando nada más que unos pocos tipos de movimientos. "Se congela el espacio y se juega con el tiempo." Pero él quería jugar también con el espacio, y con sus estudiantes encontró unas curiosas plumas en forma de seta y otras estructuras perdurables en la turbulencia. Pero no había ninguna teoría para explicar estos hallazgos: el problema del movimiento completamente desordenado seguía sin resolverse. "No veía la razón de continuar acumulando datos", comenta. Convencido de que todos los problemas interesantes y accesibles sobre la materia condensada ya habían sido estudiados, Libchaber se abrió paso por otra vereda en 1991; esta vez escogió la biología, y se trasladó a la Universidad de Princeton y al Instituto NEC.

"Chicago es un punto fijo inestable", explica. Los científicos son atraídos hacia él, pero lo abandonan en busca de los verdaderos puntos fijos de la costa este y de la costa oeste. Princeton tampoco estaba hecho para él. "La gente trabaja en casa, no se les ve mucho. No había forma de trabar lazos", resume. En 1994 Libchaber se trasladó a la Universidad Rockefeller y se rodeó de biólogos. Un motivo un poco extraño para este traslado: la ciudad de Nueva York. "Es fea, sucia, corrupta. Pero está viva. Aquí todo es posible." Vaga horas y horas por sus calles, gozándose en la diversidad de las razas. No echa de menos la naturaleza; ya hay bastante en el laboratorio.

Gran parte de la biología le resulta a Libchaber extrañamente familiar. Al igual que las plumas turbulentas, el fluido de las células es muy poco cooperativo. Su elevada viscosidad impide el movimiento, mientras que sus moléculas bombardean sin cesar los orgánulos. "¿Cómo pueden las leyes de la física aplicarse a un entorno tan difícil para crear alta tecnología?", se pregunta. Un enjambre de máquinas microscópicas mantiene las cosas en movimiento, observa: "Hay bombas, motores, canales, autopistas. Tanto es así, que uno tiene la impresión de que no hemos inventado nada, que la naturaleza ya lo había descubierto antes. Nosotros sólo redescubrimos."

Pero Libchaber resalta una distinción fundamental entre biología y física. Los físicos construyen un mundo simplificado cuyo comportamiento pueden predecir; los biólogos estudian el mundo tal como lo encuentran, poniendo de relieve la naturaleza de la vida. "Si un ingeniero quiere construir un cohete, lo diseña de un modo diferente de los demás motores. [La vida] empieza por un motor clásico, le añade algunas cosas, lo hace mucho más complejo. No hay ningún plan, sólo evolución. Algunas cosas son inútiles, [pero] no se desechan." A pesar de todo, este poco elegante proceso de "ensayo y error" produce máquinas y ordenadores de grandísima eficiencia, capaces de detectar un fotón o una molécula. Un día, sueña Libchaber, construirá un mundo vivo elemental a partir de materia prima, tan pequeño y completo como un copo de nieve.

Ciencia y sociedad

Cacao

Su domesticación

El cacao (*Theobroma cacao* L.) procede del continente americano. Se trata de uno de los cultivos tropicales más importantes del mundo, cuyas semillas forman la base de la industria chocolatera.

Durante largo tiempo el origen de la domesticación de esta planta constituyó un misterio, y son muchas las cuestiones que están todavía por resolver. Varias son las razones de ese lento conocimiento: ignorancia de su distribución geográfica natural, dispersión mediada por humanos, antigüedad de su cultivo —que se viene practicando desde hace más de dos mil años—, desconocimiento de las características morfológicas distintivas de los cacaos silvestres y cruzamiento entre formas silvestres y cultivadas.

CULTIVARES DE CACAO
CACAOS SILVESTRES DE AMERICA DEL SUR
CACAOS SILVESTRES DE MEXICO
HERRANIA

Relaciones genéticas de las distintas líneas de cacao: cultivados, silvestres y género Herrania*, el más próximo al género* Theobroma

Existen dos hipótesis sobre el origen de la domesticación del cacao. Según la primera, el centro de origen y domesticación de este cultivo residiría en la porción este del Amazonas. A partir de esos cacaos silvestres derivarían todas las variedades cultivadas. Esta hipótesis halla respaldo en la enorme variación morfológica de los cacaos silvestres que crecen en la Amazonía. Pero tiene su talón de Aquiles en la falta de pruebas históricas que avalen su cultivo en el Amazonas antes de la llegada de los españoles.

La segunda hipótesis sugiere que la domesticación del cacao comenzó en Mesoamérica y propone que la distribución natural del cacao va desde Amazonas hasta el sureste de México. Se justifica esa opinión con una avalancha de datos históricos e iconográficos del cultivo del cacao durante tiempos prehispánicos en Mesoamérica. Para los mayas el cacao desempeñó un papel muy importante en el establecimiento y desarrollo de sus actividades económicas, políticas y sociales. En 1566, Diego de Landa escribió en sus *Relaciones de Valladolid* que los mayas "tenían cultivos sagrados donde cultivaban ciertos árboles, como el cacao". La prueba más sólida de esta hipótesis es la presencia de poblaciones silvestres de cacao en el sureste mexicano.



Fruto de cacao silvestre en el sureste mexicano

En 1964, Miranda daba cuenta de la presencia de poblaciones silvestres en la selva lacandona del estado mexicano de Chiapas. En 1991, un grupo de investigadores mexicanos encontró poblaciones silvestres de cacao en el estado de Yucatán; las plantas descubiertas en esta península mostraban similaridad morfológica con las registradas por Miranda en el estado de Chiapas.

Pero no podemos determinar todavía el origen de los cacaos del sureste mexicano. A este respecto, se ignora si son poblaciones silvestres, si son antiguos cultivares de los mayas o si son introducciones recientes de cultivares modernos. En nuestra opinión, lo más verosímil es que las poblaciones de cacao silvestre encontrados en el estado de Yucatán sean representantes actuales de antiguos cultivares mayas.

Podemos recurrir al análisis de la variabilidad genética de las semillas para establecer las características distintivas de cada grupo de cacao y determinar probables relaciones de parentesco entre formas silvestres y domesticadas.

Con el fin de averiguar qué relaciones genéticas existen entre cacaos silvestres del sureste mexicano, cacaos silvestres de América del Sur y formas cultivadas actuales del cacao, un equipo de investigadores del Centro de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México, junto con otro de la Universidad de California en Riverside, realizaron un estudio comparativo. Se sirvieron de marcadores moleculares RAPD, acrónimo de "Random Amplified Polimorphic DNA" ("ADN polimórfico y amplificado de manera aleatoria").

El estudio abarca 42 muestras que incluyen árboles de cacaos silvestres del sureste mexicano y de América del Sur, las tres formas de cacao cultivado (criollo, trinitario y forastero) y el genero *Herrania*, que es

el genero más cercano a *Theobroma*. Las relaciones entre las series se establecieron mediante un análisis de agrupamiento basado en la similaridad genética de los árboles de cacao. Este es el primer estudio de variación genética del cacao en el que se incluyen los árboles silvestres del sureste mexicano.

Los resultados del análisis indican que los especímenes silvestres provenientes del sureste mexicano forman un grupo independiente, separado del grupo formado por los cacaos cultivados y los cacaos silvestres de América del Sur. Los cacaos que se cultivan actualmente guardan un parentesco muy cercano con los cacaos silvestres de América del Sur. Los cacaos silvestres del sureste mexicano distan genéticamente de los cacaos silvestres de América del Sur y de todas las variedades de cacao que se cultivan hoy. Por esta razón, las formas silvestres localizadas en el sureste mexicano representan el mayor recurso de variación genética del cacao en América.

La amplia diversidad genética de las poblaciones silvestres permite abrigar la esperanza de que los programas de mejoramiento del cacao cobren especial impulso. Hasta ahora sólo se empleaban genotipos de América del Sur, con absoluta ignorancia de los genotipos del sureste mexicano.

MARLENE DE LA CRUZ,
LUIS MOTA-BRAVO
y ARTURO GÓMEZ-POMPA,
Centro de Ecología, UNAM,
México.
RICHARD WHITKUS
Universidad de California,
Riverside

Dinosaurios carnívoros

de Sudamérica

Las investigaciones paleontológicas en el continente sudamericano han llevado al descubrimiento, a lo largo de los últimos diez años, de una fauna de dinosaurios carnívoros cretácicos muy interesante, la mayoría proveniente de la Patagonia argentina.

Por casi un siglo, nuestro conocimiento de estos animales estuvo limitado a *Genyodectes serus* (forma representada únicamente por un premaxilar y un dentario) y a varios fragmentos óseos o algunos dientes aislados.

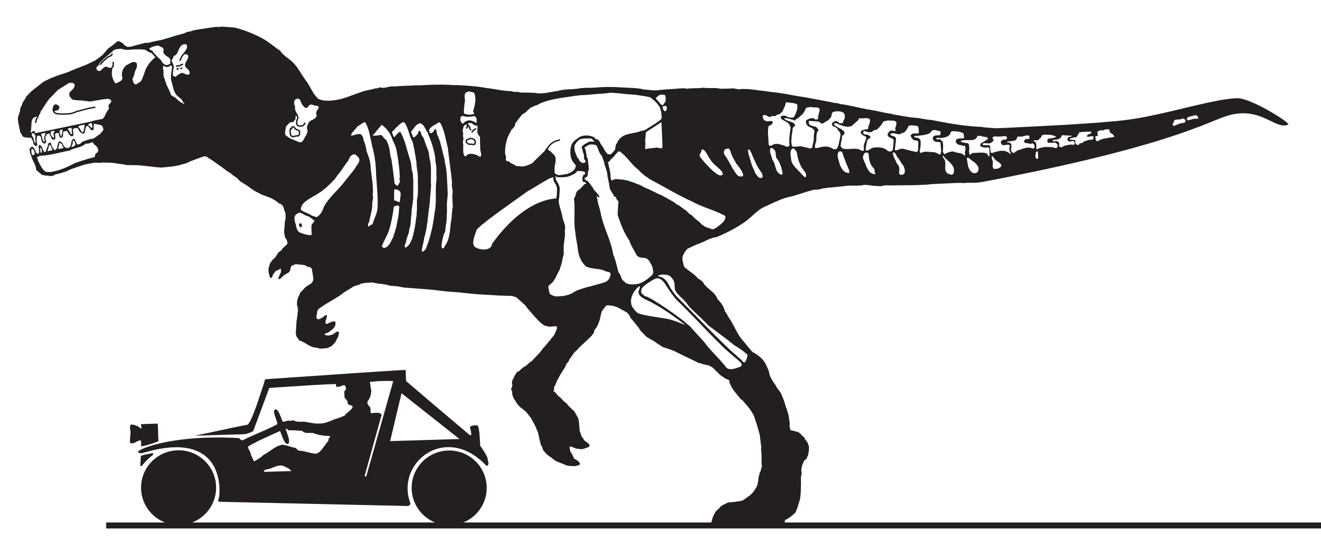
En 1980, José Bonaparte y Jaime Powell comunicaron el hallazgo de *Noasaurus leali* en la provincia de Salta, al norte de Argentina, representado por algunos huesos del cráneo, un par de vértebras y algunos huesos de las patas. Si bien en un principio se vinculó esta especie a los Coelurosaurios, debido sobre todo a su reducido tamaño, hoy aceptamos que guarda parentesco mayor con los Abelisaurios, uno de los principales grupos de dinosaurios sudamericanos, y tal vez de Gondwana.

Este importante grupo de dinosaurios se conoció en 1985, cuando Bonaparte y Fernando Novas, ambos del Museo Argentino de Ciencias Naturales de Buenos Aires, presentaron a *Abelisaurus comahuensis*, un gran depredador proveniente del norte de la Patagonia, en la vecindad del lago Pellegrini. Aunque sólo se conoce el cráneo de este animal, podemos estimar que la longitud del mismo era de unos siete metros, con un peso de alrededor de cuatro toneladas. *Abelisaurus* fue hasta hace muy poco tiempo el mayor dinosaurio carnívoro de Sudamérica.

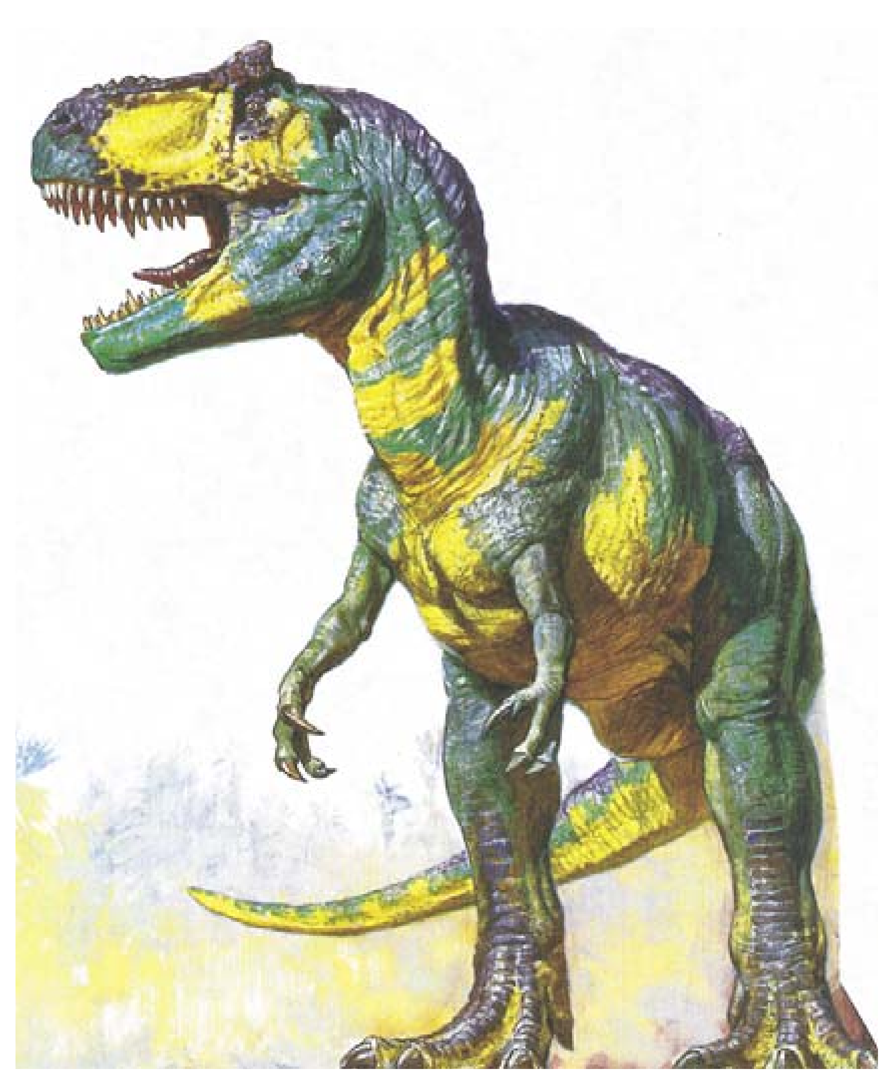
Por la misma época del descubrimiento de *Abelisaurus*, se halló el abelisaurio *Carnotaurus sastrei*, de la provincia de Chubut, en la zona central de Patagonia. Este enigmático dinosaurio, rescatado en casi su totalidad, nos muestra una notable variedad de depredador, con un par de robustos cuernos cónicos sobre sus órbitas, una anatomía vertebral vinculada a una musculatura poderosa en su cuello y cola, y unos miembros anteriores reducidos, cuya funcionalidad nos sigue desconcertando.

El hallazgo de *Carnotaurus* permitió elaborar una hipótesis de evolución de los abelisaurios en el Cretácico de Sudamérica, junto con *Abelisaurus* y *Noasaurus*. En efecto, el registro de algunos restos de grandes carnívoros presumiblemente relacionados con *Abelisaurus* y *Carnotaurus* en la última etapa del Cretácico de otras regiones del planeta ha llevado a proponer la existencia de una fauna pangondwánica durante el Cretácico, distinta de las del hemisferio norte, particularmente de la de Norteamérica y el resto de Asia.

Según la hipótesis pangondwánica, el largo período de aislamiento geográfico entre las masas continentales del norte (Laurasia) y del sur (Gondwana), ocurrido desde fines del Jurásico, explicaría el desarrollo de biotas diferentes durante el Cretácico en uno y otro continente. En cuanto a los dinosaurios carnívoros, Bonaparte, uno de los principales promotores de esta idea, consideró que, durante el Cretácico de Gondwana, el



1. Esquema del esqueleto rescatado de Giganotosaurus carolinii*, comparado con un vehículo arenero similar al utilizado por Rubén Carolini en sus expediciones en búsqueda de restos de dinosaurios*



2. Reconstrucción de Giganotosaurus carolinii *realizada por James Gurney*

rol de grandes predadores estuvo a cargo de los abelisáuridos, una familia creada por él mismo para incluir *Abelisaurus* y *Carnotaurus*. Bonaparte interpretó que los abelisáuridos gondwánicos habrían sido equivalentes ecológicos de otros grandes dinosaurios carnívoros del hemisferio norte, en particular de los tiranosáuridos.

Pero se han producido últimamente en Patagonia varios descubrimientos de interés que agregan nuevos elementos al debate sobre las evolución de los dinosaurios carnívoros.

En 1993, un habitante de la pequeña población de El Chocón, al norte de la Patagonia, encontró unos enormes huesos que denunció de inmediato a las autoridades provinciales del área de paleontología. Los materiales se encontraron sobre sedimentos de la Formación Río Limay, correspondientes al Cretácico "Medio" (Albiano-Cenomaniano), de unos 100 millones de años de antigüedad.

Como resultado de los trabajos de campo pudimos rescatar casi el 70 % de un esqueleto: buena parte del cráneo, algunas vértebras presacras, unas 20 vértebras de la cola, la cintura escapular, la cadera completa, ambos fémures, tibia y fíbula. A partir de estos restos fósiles pudimos llegar a ciertas conclusiones interesantes.

En primer lugar, se trataba de un dinosaurio carnívoro gigantesco, mucho mayor que cualquier otro dinosaurio carnívoro sudamericano, e incluso algo mayor que *Tyrannosaurus rex*. Llama la atención la longitud del fémur (unos 143 centímetros) y la de la tibia (112 centímetros).

El análisis pormenorizado de la anatomía del dinosaurio nos permitió arribar a otra conclusión no menos sorprendente. Se trataba de un terópodo (dinosaurio carnívoro) que no pertenece a la familia de los abelisáuridos, sino a otro grupo de terópodos, el de los Tetanurae, animales con un buen registro en el hemisferio norte, que incluye, entre otros, a los tiranosáuridos y a las aves. (Los Tetanurae presentan la tibia con cresta fibular, tubérculo anterior en la fíbula y proceso ascendente del astrágalo más del 20 % del largo total de la tibia.) Si bien escasos, primitivos Tetanurae no son desconocidos en Sudamérica. El mismo Bonaparte dio a conocer a *Piatnizkysaurus floresi*, un reptil de tamaño mediano que vivió durante el Jurásico Medio de Patagonia, probablemente relacionado con *Allosaurus fragilis*, del Jurásico Superior de Norteamérica.

El nombre que se propuso para este nuevo gran dinosaurio de El Chocón es *Giganotosaurus* ("lagarto gigante del Sur") *carolinii*, en homenaje a Rubén Carolini, quien encontró las primeras piezas del fósil. Algunas particularidades de su anatomía nos informan que, dentro de los Tetanurae, *Giganotosaurus* se ubica más cerca de los Neotetanurae (Allosauroideos + Coelurosauria) que de los Torvosauroideos (un grupo no muy bien conocido de tetanuros). Su cráneo, inmenso, ha sido estimado en 180 centímetros de longitud; sus dientes alcanzaban los 20 cm. Los huesos de esta bestia eran más robustos que los de *Tyrranosaurus* por lo que podemos suponer que se trató de un animal bastante más pesado.

La pertenencia de *Giganotosaurus carolinii* al grupo de los Tetanurae nos permite hipotetizar que el pleno dominio de los abelisáuridos sudamericanos dentro del nicho de los grandes carnívoros, si es que realmente sucedió como sostienen algunos, se habría producido hacia finales del Cretácico. Hasta ese momento, los ceratosaurios (grupo al que pertenecen los abelisáuridos y otros dinosaurios carnívoros más antiguos) se hallarían en desventaja respecto de los grandes dinosaurios Tetanurae. Tal vez alguna causa que desconocemos produjo la extinción en Sudamérica de los grandes tetanuros, hecho que permitió la posterior expansión y diversificación de los abelisáuridos.

Posiblemente en Africa la situación fue algo diferente. Allí, según una interpretación reciente de Paul Sereno, de la Universidad de Chicago, los terópodos Tetanurae pertenecientes al grupo de los Torvosauroideos no se habrían extinguido, sino que habrían alcanzado el Cretácico Superior. En Africa el registro de dinosaurios abelisáuridos es casi inexistente.

RODOLFO A. CORIA
Museo Carmen Funes de Neuquén,
LEONARDO SALGADO
Museo Universidad Nac. del Comahue
Neuquén, Argentina

Fisiología humana

Hormona de crecimiento placentaria

La hormona de crecimiento placentaria es una hormona polipeptídica. Durante la gestación, va sustituyendo progresivamente a la hormona de crecimiento hipofisaria en la circulación materna. La sintetiza y segrega el sincitiotrofoblasto, una zona ectodérmica extraembrionaria de función nutritiva.

Como toda proteína, está determinada por un gen. El gen de esta hormona (HC2 o HC-V) forma parte de un grupo ("cluster") de genes relacionados con la hormona de crecimiento humana (HCh) localizados en el brazo largo del cromosoma 17, en el que ocupan una longitud de 66,5 kilobases. Los cinco genes que integran el grupo, alineados en dirección 5′ a 3′, son los siguientes: gen de la hormona de crecimiento hipofisaria, pseudogén 1 de la somatomamotropina coriónica, gen 1 de la hormona somatomamotropina coriónica, gen de la hormona de crecimiento placentaria y gen 2 de la somatomamotropina coriónica (CSH2). Todos ellos constan de cinco exones y cuatro intrones y muestran entre sí un alto grado de homología estructural, lo que sugiere que proceden de un gen ancestral común, a través de una serie de recombinaciones homólogas y desiguales que dieron lugar a duplicaciones génicas.

Así como el gen de la hormona de crecimiento hipofisaria se expresa en las células somatotropas de la hipófisis y su producto es una proteína de 191 aminoácidos, el gen HC2 se expresa en la placenta y da lugar también a una proteína de 191 aminoácidos que difiere de la hipofisaria en 13 residuos. La hormona placentaria se secreta en dos formas o variantes moleculares, una variante glicosilada de 25 kilodaltons y una forma no glicosilada de 22 kilodaltons.

Aunque falta mucho por conocer sobre la fisiología de la hormona de crecimiento placentaria, disponemos ya de un conjunto de datos que indican la importancia del polipéptido en la regulación del crecimiento y desarrollo fetal. A este propósito, se ha demostrado que existe correlación entre la velocidad de crecimiento intrauterino y la concentración de hormona placentaria y factor de crecimiento similar a la insulina (IGF-I) en suero materno; ambas moléculas presentan un bajo nivel de concentración en los recién nacidos con retraso de crecimiento intrauterino.

Se ignora el mecanismo a través del cual la hormona placentaria regula el crecimiento fetal. No parece probable que ejerza una acción directa sobre el feto, pues no ha podido demostrarse su presencia en la circulación fetal ni en la sangre de cordón; sí se han encontrado niveles crecientes en suero materno a partir de la 15 a 20 semanas de gestación, incremento que corre paralelo con el de la concentración del factor de crecimiento. De ello se desprende un efecto metabólico en la madre en un momento en que la hormona hipofisaria es ya indetectable.

Representación esquemática del agregado de genes al que pertenece el de la hormona de crecimiento placentaria, con su localización en el brazo largo del cromosoma 17. En la parte inferior de la figura se ha amplificado el gen de la hormona de crecimiento placentaria con sus 5 exones (I-V) y 4 intrones

Aunque la síntesis del factor de crecimiento se desarrolla sobre todo en el hígado, una parte del mismo se forma en la propia placenta, donde se segrega hacia la circulación materna. Cumpliría, pues, a la hormona placentaria modular la concentración del factor de crecimiento, al intervenir en la síntesis de éste, lo mismo en el hígado que en el sincitiotrofoblasto. A través de la regulación de los niveles del factor de crecimiento y de las acciones directas sobre el metabolismo de los hidratos de carbono y de los lípidos, la hormona placentaria mantendría elevadas concentraciones de nutrientes en la madre y facilitaría su transferencia al feto.

Junto a este mecanismo de acción indirecto, de inducción de cambios metabólicos en la madre, la hormona de crecimiento placentaria influiría en el desarrollo de la placenta a través de un control autocrino dentro del sincitiotrofoblasto. Esta masa citoplasmática produce la hormona placentaria, expresa los receptores del polipéptido y está sometida a sus acciones metabólicas. En las situaciones de retraso de crecimiento intrauterino, con el menor tamaño de la placenta se observa, en estudios de hibridación *in situ*, una alteración del proceso de desarrollo y maduración del tejido placentario responsable de la disminución del número de células que expresan el gen.

En resumen, la hormona de crecimiento placentaria constituye un importante regulador del crecimiento fetal, a través de la modulación del metabolismo materno y de las funciones endocrinas y paracrinas de la placenta. Su determinación en suero materno puede ser útil para valorar trastornos del crecimiento fetal secundarios a alteraciones del desarrollo y función de la placenta.

MANUEL HERNÁNDEZ
Hospital del Niño Jesús. Madrid

Gastroenteritis

Y sida

Los procesos diarreicos, o gastroenteritis, se producen con una elevada frecuencia en la población infantil sana. Entre los numerosos microorganismos implicados encontramos bacterias, parásitos y virus. Suelen ser procesos autolimitados, que no requieren un tratamiento antibiótico específico y que se resuelven mediante un dieta astringente.

En los pacientes inmunodeprimidos, las gastroenteritis constituyen una complicación bastante frecuente, sobre todo en los pacientes infectados por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). Presenta en éstos una incidencia entre el 30-90 %, superior a la observada en la población sana. Los procesos diarreicos aparecen en las etapas sintomáticas de la enfermedad y durante su progresión hacia el sida. Las gastroenteritis son generalmente de tipo crónico con una duración superior a 1 mes y comportan el agravamiento del estado del paciente, debido a la progresiva deshidratación que sufren los mismos tras las importantes pérdidas hidroelectrolíticas en sus heces.

En los pacientes sanos el establecimiento de la etiología de las gastroenteritis es un proceso complejo; sólo se descubren las causas en un 45-50 % de los casos. En los pacientes con sida, además de los microorganismos implicados en las diarreas de la población sana, aparecen microorganismos oportunistas, así llamados porque aprovechan la alteración del sistema inmunitario que sufren. Por ello, la etiología es mucho más amplia, pudiendo llegarse a establecer la causa del proceso diarreico en el 75-85 % de pacientes.

A diferencia de lo observado en la población general, los microorganismos que con mayor frecuencia determinan la gastroenteritis de los sidosos son los parásitos. Predomina, además, un conjunto de géneros y especies que sólo ocasionalmente afectan a la persona sana. Destacan de forma preferente los géneros *Cryptosporidium* sp. y *Microsporidium* sp., con unos porcentajes de participación etiológica situados entre el 15-30 % y 10-25 %, respectivamente. Comunes a sidosos y sanos son los enteroparásitos *Isospora belli*, *Entamoeba* sp. y *Giardia lamblia*.

Ciertas bacterias desencadenan también procesos diarreicos en los pacientes de sida. Su participación se cifra en un 15-25 por ciento de los casos. Nos referimos en particular a *Salmonella enterica*, *Campylobacter* sp., *Aeromonas* sp., *Shigella* sp. y *Clostridium difficile*. Que el agente sea una u otra dependará del estadio clínico del enfermo y del grupo de riesgo al que pertenezca. Estos pacientes suelen tener porcentualmente más gastroenteritis inflamatorias y hemorrágicas por *Campylobacter* sp. y *Aeromonas* sp. que la población general. Además, muestran una elevada tendencia a presentar bacteriemias y cuadros sépticos generales causados por los mismos microorganismos responsables del proceso diarreico (*Salmonella enterica* y *Campylobacter* sp.), determinando con ello una mayor gravedad y diseminación del proceso intestinal.

No podemos olvidar el papel de las micobacterias, agentes causantes de la tuberculosis. La frecuencia de enteritis por *Mycobacterium avium* en pacientes con sida parece oscilar entre el 5-23 %, aunque en algunos casos su detección en heces puede ser consecuencia de una infección diseminada y no estar asociada a un verdadero proceso diarreico.

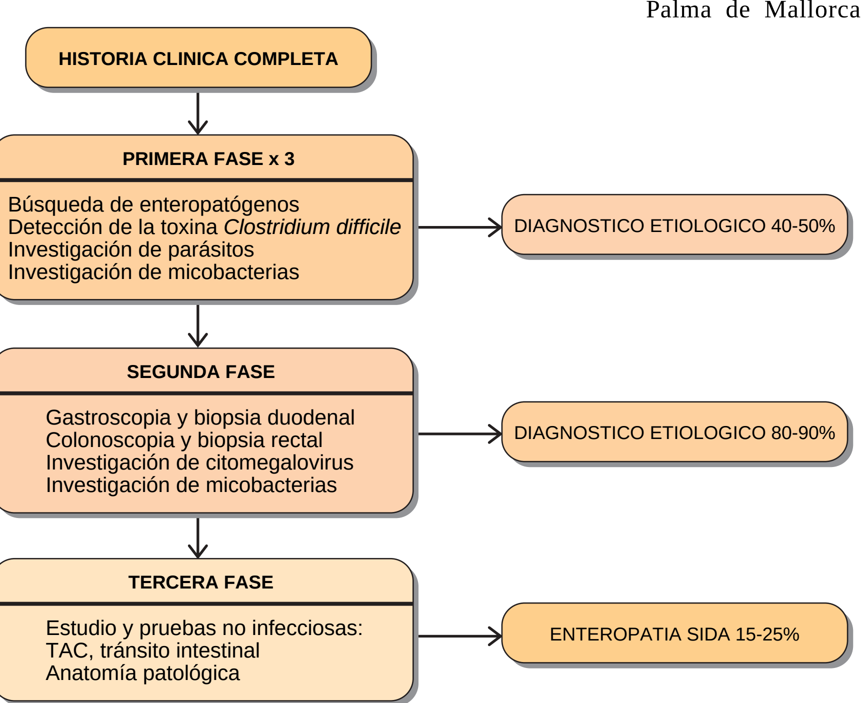
No se ha establecido todavía de una forma definitiva la participación de los virus en las diarreas de los pacientes con sida. Los estudios controlados parecen demostrar que la incidencia de infecciones por rotavirus y adenovirus es similar a la que se produce en personas sanas, aunque difieran un tanto sus características clínicas. En cambio, pueden hallarse citomegalovirus en cerca del 90 % de los pacientes con sida. Aunque su infección afecta todo el tracto digestivo, la principal manifestación clínica es una colitis, proctitis o ambas, asociadas normalmente a un proceso diarreico de tipo hemorrágico.

Los pacientes con sida desarrollan en muchas ocasiones procesos diarreicos crónicos de origen no infeccioso. Esta entidad, designada como enteropatía del sida, forma parte de la sintomatología clínica evolutiva de estos pacientes y se diagnostica generalmente por exclusión de la etiología microbiana.

El diagnóstico etiológico de la gastroenteritis en los pacientes con sida es un proceso bastante complejo y debería realizarse de una forma secuencial. El primer paso consistiría en la realización de tres cultivos de heces (coprocultivos), en los que se incluyera la búsqueda de todos los enteropatógenos reconocidos, detección de toxina de *Clostridium difficile* y un estudio parasitológico completo, con tinciones para micobacterias. En una segunda fase debería realizarse una colonoscopia y gastroscopia con toma de muestras y cultivo para micobacterias y virus. En general siguiendo esta secuencia diagnóstica se consigue establecer la etiología infecciosa del proceso diarreico con un elevado porcentaje de probabilidad.

El tratamiento de las gastroenteritis en los pacientes con sida depende fundamentalmente del agente causal y del estado inmunitario del enfermo. Las diarreas por microorganismos habituales se tratan, cuando sea preciso, como en las personas sanas, mientras que se precisan de fármacos especiales, no siempre con buenos resultados, para el tratamiento adecuado de las gastroenteritis parasitarias y víricas.

JORDI REINA PRIETO
Hospital Universitario Son Dureta.
Palma de Mallorca



Esquema diagnóstico de las gastroenteritis infecciosas en pacientes con sida

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Depredador y superdepredador

Las redes alimentarias se alargan y ramifican en las selvas tropicales. El naturalista encuentra en ellas numerosos ejemplos de depredación a distintas escalas espaciales y en diversos hábitats y microhábitats. La pluviselva atlántica, una de las más amenazadas del mundo, ubicada en el sector costero de Brasil, no es una excepción. La superficie del suelo es rica en hojarasca y restos de ramas secas, donde vive una fauna variopinta. Destaca, por lo bien que se camufla entre la hojarasca, cierto sapo cornudo de la familia de los Leptodactílidos. Pertenece al género *Proceratophrys*, de los que existen varias especies en la selva lluviosa del Atlántico brasileño. El ejemplar que ofrecemos se inscribe en la especie *P. appendiculata*.

Nuestro sapo desarrolla su actividad durante el día, a la caza de otros anfibios. Lo vemos aquí entre las fauces de *Xenodon neuwiedii*, serpiente de la familia *Colubridae*, subfamilia *Xenodontinos*, típica de América del Sur y adaptada para la caza en la superficie del suelo; se alimenta de anfibios y, puestos a escoger, de los incluidos en el género *Bufo*. Por algo el último diente del ofidio está capacitado para perforar el pulmón del anfibio y deshincharlo, cuando éstos lo hinchan en un movimiento de defensa para impedir ser tragados.

Nos encontrábamos en el parque nacional Itatiaia, próximo a Río de Janeiro y uno de los más antiguos del país. Las condiciones climáticas propiciaron la reproducción del sapo cornudo, que aparecía por todos los vericuetos del parque. Bastó con esperar pacientemente en un sector abierto, donde copulaban varias parejas de sapos. Mientras los fotografiábamos con flash y macros de 105 mm y de 200 mm, apareció de repente la serpiente atraída por la abundancia de presas, y delante nuestro engulló al ejemplar de la foto.





Chernóbil, diez años después

Las consecuencias para el ambiente y la salud de la mayor catástrofe producida en una central nuclear perdurarán a través de generaciones

Yuri M. Shcherbak



"Era como si el mundo llegase a su fin... No daba crédito a lo que veían mis ojos: el reactor hecho trizas por la explosión. Nadie antes había contemplado semejante desastre. Como soy ingeniero nuclear, me di cuenta enseguida de las consecuencias que tendría lo que había pasado. Un infierno nuclear. Sentí pánico."

Así me escribía, en 1986, el jefe encargado del reactor nuclear que estalló en la central de Chernóbil (en el norte de Ucrania). La explosión y el incendio que produjo esparcieron cenizas radiactivas por buena parte de la Europa oriental. Aunque no reconoció su culpa, fue luego uno de los encarcelados por la parte que le tocaba en el desastre.

Las investigaciones oficiales subsiguientes han demostrado, sin embargo, que la responsabilidad de esta tragedia espantosa no correspondía sólo a quienes vigilaban la central la noche del 25 y la madrugada del 26 de abril de 1986. Las consecuencias, igualmente, se han extendido mucho más allá de la industria nuclear; los problemas que se han suscitado son fundamentales en una civilización dominada por la técnica. Antes de la explosión, Chernóbil era una pequeña ciudad apenas conocida para el resto del mundo. Desde entonces, su nombre ha entrado en los anales de la historia asociado al peor desastre ambiental de origen técnico. En todo el mundo es metáfora de catástrofe, lo mismo que "Stalingrado" o "Bophal". Sus repercusiones políticas aceleraron el derrumbe del imperio soviético.

YURI M. SHCHERBAK es embajador de Ucrania en los Estados Unidos. Se graduó en la facultad de medicina de la Universidad de Kiev en 1958, especializándose en epidemiología. En 1988 fundó y dirigió el Movimiento Verde Ucraniano, hoy Partido Verde. En 1989 consiguió un escaño en el Soviet Supremo de la URSS, donde, siendo uno de los líderes de la oposición, puso en marcha la primera comisión parlamentaria sobre el accidente de Chernóbil.

La importancia de este desastre para toda la humanidad obliga a conocer las razones de que sucediera así como sus consecuencias. Son bien sabidos los hechos que condujeron a la explosión. El reactor número cuatro, un RBMK-1000, de 1000 megawatts, producía vapor que movía los generadores de electricidad. La noche del accidente los técnicos realizaban una prueba; querían ver cuánto tiempo funcionaban los generadores sin energía. Para ello redujeron mucho la que producía el reactor y bloquearon el flujo de vapor hacia los generadores.

Por desgracia, el diseño del RBMK-1000 tiene un defecto que vuelve inestable su funcionamiento a baja energía. En esas condiciones, basta un aumento espurio de la producción de vapor para que se acelere la de energía en el reactor. Si entonces se genera más vapor, puede haber una erupción desbocada de energía. Además, los técnicos, para que no perturbasen los resultados de la prueba, habían desconectado los sistemas de seguridad, que podrían haber evitado la destrucción del reactor.

A la una y veintitrés con cuarenta segundos de la madrugada del 26 de abril, tardíamente consciente de que la situación se había vuelto peligrosa, un empleado apretó un botón que activaba el sistema automático de protección. Se proponía con ello apagar el reactor, pero ya era demasiado tarde. Lo que en realidad pasó fue como si un conductor pisase el freno para disminuir la velocidad de su coche y provocase, por contra, una aceleración incontrolable.

En tres segundos, la producción de energía del núcleo del reactor centuplicó el nivel máximo normal y la temperatura subió drásticamente. El resultado fueron dos explosiones que hicieron volar por los aires la placa metálica de 2000 toneladas de peso que sellaba la parte superior del reactor y destruyeron el edificio donde se albergaba. El genio nuclear había sido liberado.

Pese a los heroicos esfuerzos por extinguir el fuego que siguió a la explosión, durante diez días ardieron los cientos de toneladas de grafito que hacían de moderador en el reactor. Los gases calientes que ascendían llevaron al exterior, convertidos en aerosoles, el combustible y los productos de fisión, es decir, los isótopos que se crean cuando los átomos de uranio se escinden. El combustible era, sobre todo, uranio, mezclado con cierta cantidad de plutonio, subproducto del funcionamiento normal del reactor. El plutonio es el elemento más tóxico que se conoce, y algunos de los productos de fisión eran mucho más radiactivos que el uranio o el plutonio. Entre los más peligrosos estaban el yodo 131, el estroncio 90 y el cesio 137.

Un penacho con estos elementos avanzó, arrastrado por los vientos dominantes, hacia el norte y el oeste, y depositó partículas radiactivas sobre zonas situadas a miles de kilómetros. Entre las regiones afectadas no sólo estaba la propia Ucrania, sino también Bielorrusia, Rusia, Georgia, Polonia, Suecia, Alemania y Turquía. Ni siquiera los remotos Estados Unidos y Japón quedaron exentos de dosis mensurable de radiación. En Polonia,



1. ZONA PROHIBIDA: un policía ucraniano controla el acceso a una localidad del distrito de Narodichi, región evacuada tras la explosión en la cercana central de Chernóbil que causó la precipitación de partículas radiactivas.

Alemania, Austria, Hungría y Ucrania hubo que destruir las cosechas y la leche contaminadas, mientras que en Finlandia, Suecia y Noruega hubo que deshacerse de los renos muertos que habían pacido la vegetación irradiada.

Nunca se sabrá la cantidad total de radiactividad liberada, pero la cifra soviética oficial de 90 millones de curies es un mínimo. Otros cálculos sugieren que el total quizá fuese varias veces mayor. No es exagerado decir que, por lo que se refiere a la caída de partículas radiactivas —aunque no, claro, por sus efectos térmicos y explosivos—, el accidente fue comparable a un bombardeo nuclear de magnitud media. En los momentos inmediatamente siguientes a la explosión y el fuego, 187 personas manifestaron un envenamiento agudo por radiaciones; 31 de ellas murieron. La mayoría de estas primeras víctimas eran bomberos que combatían el fuego.

El reactor destruido liberó cientos de veces más radiación que los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki. La intensidad de la radiación gamma en la central nuclear superó los 100 roentgens por hora. Este nivel produce en una hora una dosis cientos de veces la máxima que la Comisión Internacional de Protección Radiológica admite para el público en un *año*. En el techo del edificio destruido del reactor, el nivel de radiación alcanzó unos terroríficos 100.000 roentgens por hora.

La dimensión humana de la tragedia es grande y sobrecogedora. En la época del accidente yo era investigador médico en el Instituto de Epidemiología y Enfermedades Infecciosas de Kiev, a unos cien kilómetros de la central de Chernóbil. El día 26, en cierto momento, un amigo me dijo que habían estado llegando personas al hospital para que las tratasen de quemaduras sufridas en un accidente en la central, pero no teníamos ni idea de si había sido grave. Hubo pocas noticias oficiales durante los siguientes días, y se dio a entender que no era mucho el peligro. Las autoridades interfirieron casi todas las emisiones extranjeras, pero oímos una emisora de radio sueca que informaba de la detección de altos niveles de radiación en ese país y en otros. Con otros compañeros, decidí acudir al lugar de accidente para investigar y ayudar en lo que pudiéramos.

Partimos con buenos ánimos, pero a medida que nos acercábamos fuimos viendo escenas de pánico. Quienes tenían contactos con los medios oficiales habían recurrido a su influencia para enviar fuera a los niños por avión o en tren. Los que no, hacían largas colas para sacar los billetes o, en ocasiones, intentaban escapar de allí tomando al asalto un tren. Las familias habían empezado a dividirse. La única perturbación social de esa magnitud que yo había visto fue en una epidemia de cólera. Ya se había hospitalizado a muchos trabajadores de la central.



2. ANTES DE UN EXAMEN de la tiroides, una niña y su madre esperan con inquietud en el Instituto de Endocrinología de Kiev. En los días y semanas que siguieron al accidente de 1986 en Chernóbil, se calcula que 13.000 niños inhalaron aerosoles que contenían altos niveles de yodo 131, isótopo radiactivo que se acumula en la tiroides. Se ha decuplicado desde entonces la incidencia de tumores tiroideos entre los niños ucranianos.

La distribución de las partículas radiactivas fue extremadamente irregular. La linde de un campo podía ser muy peligrosa, y unos cuantos metros más allá el nivel parecía bajo. Pero quedaron afectadas zonas extensísimas. Aunque el yodo 131 tiene una vida media de sólo ocho días, en las semanas siguientes al accidente este isótopo fue causa de una masiva emisión de radiación. El estroncio 90 y el cesio 137, por su parte, son más persistentes. Se cree que a largo plazo las mayores dosis de radiación serán las debidas al cesio.

Sumado todo, más de 260.000 kilómetros cuadrados del territorio de Ucrania, Rusia y Bielorrusia tienen aún más de un curie por kilómetro cuadrado de contaminación con cesio 137. Dado ese nivel, se recomienda a los residentes un examen médico anual. En mi propio país, Ucrania, el área total en esas circunstancias sobrepasa los 35.000 kilómetros cuadrados, más del cinco por ciento de su superficie total. En su mayor parte, 26.000 kilómetros cuadrados, es labrantío. Se ha restringido los cultivos en las zonas más afectadas, pero se sigue sembrando en los distritos menos contaminados.

Las partes muy contaminadas de Ucrania abarcan trece regiones administrativas (*oblast*). En ellas hay 1300 pueblos, que suman 2,6 millones de habitantes, de los que 700.000 son niños. En el plazo de unos diez días tras el accidente, abandonaron sus hogares 135.000 personas que vivían en las zonas más afectadas; en estos momentos han emigrado ya 167.000. Pero está claro que el empeño de las autoridades en ocultar la magnitud de la hecatombe agravó inútilmente la situación. Si se hubiesen evacuado un número mayor de habitantes de la región durante los primeros días, los más cruciales, muchos habrían recibido dosis de radiación menores.

En treinta kilómetros a la redonda de la central de Chernóbil apenas vive ahora nadie. Se han evacuado también 60 pueblos que estaban fuera de esa zona. Emplazamientos antaño dinámicos son ahora pueblos fantasmas. El gobierno ha reaccionado promulgando leyes que conceden una categoría especial a las áreas contaminadas y garantizan protección a quienes más sufrieron. Pero las repercusiones durarán generaciones.

Las consecuencias médicas son, por supuesto, las más serias. De los 400.000 trabajadores que hicieron de "liquidadores" —personal militar y civil que se ocupó de enterrar los residuos más peligrosos y de construir en torno al reactor siniestrado un edificio especial, el "sarcófago"— han caído enfermos unos 30.000. De éstos, unos 5000 han quedado inválidos.

No es fácil averiguar, ni siquiera de forma aproximada, cuántas personas han muerto ya a causa del accidente. Las poblaciones se han dispersado y a los niños se los ha alejado de algunas áreas. Mediante la comparación de los índices de mortalidad de antes y después del accidente, la organización Greenpeace Ucrania ha calculado un total de 32.000 muertos. Unos cálculos arrojan una cifra mayor, otros menor, pero creo que una cifra de esa magnitud es defendible. Puede que algunas, quizá muchas, de esas muertes se deban a la inmensa tensión psicológica que sufren quienes viven en la región contaminada.

El examen médico de un numeroso grupo de liquidadores, efectuado por investigadores de Kiev dirigidos por Sergei Komissarenko, ha descubierto que la mayor parte de la muestra sufría una constelación de síntomas que, juntos, parecen definir un nuevo síndrome médico. Entre los síntomas se aprecian fatiga, apatía, un menor número de células "asesinas naturales" en la sangre.

Las células asesinas naturales, un tipo de leucocitos, matan las células de los tumores y las infectadas por virus. La caída de su número debilita el sistema inmunitario. Algunos han llamado a este síndrome "el sida de Chernóbil". Además de incrementarse la tasa de leucemia y tumores malignos, quienes padecen el síndrome se hallan expuestos a cardiopatías severas e infecciones comunes como bronquitis, tonsilitis y neumonías.

Al haber inhalado aerosoles que contenían yodo 131 inmediatamente tras el accidente, 13.000 niños de la región quedaron expuestos a dosis de radiación en la tiroides de más de 200 equivalentes roentgen. (Quiere decir que recibieron por lo menos el doble del máximo admitido para los trabajadores de la industria nuclear en un año entero.) Hasta 4000 de esos niños sufrieron dosis de 2000 equivalentes roentgen. Como el yodo se acumula en la glándula tiroides, han desarrollado una inflamación tiroidea crónica. La inflamación no produce síntomas por sí misma, pero

ha empezado a generar una ola de casos de cáncer de tiroides.

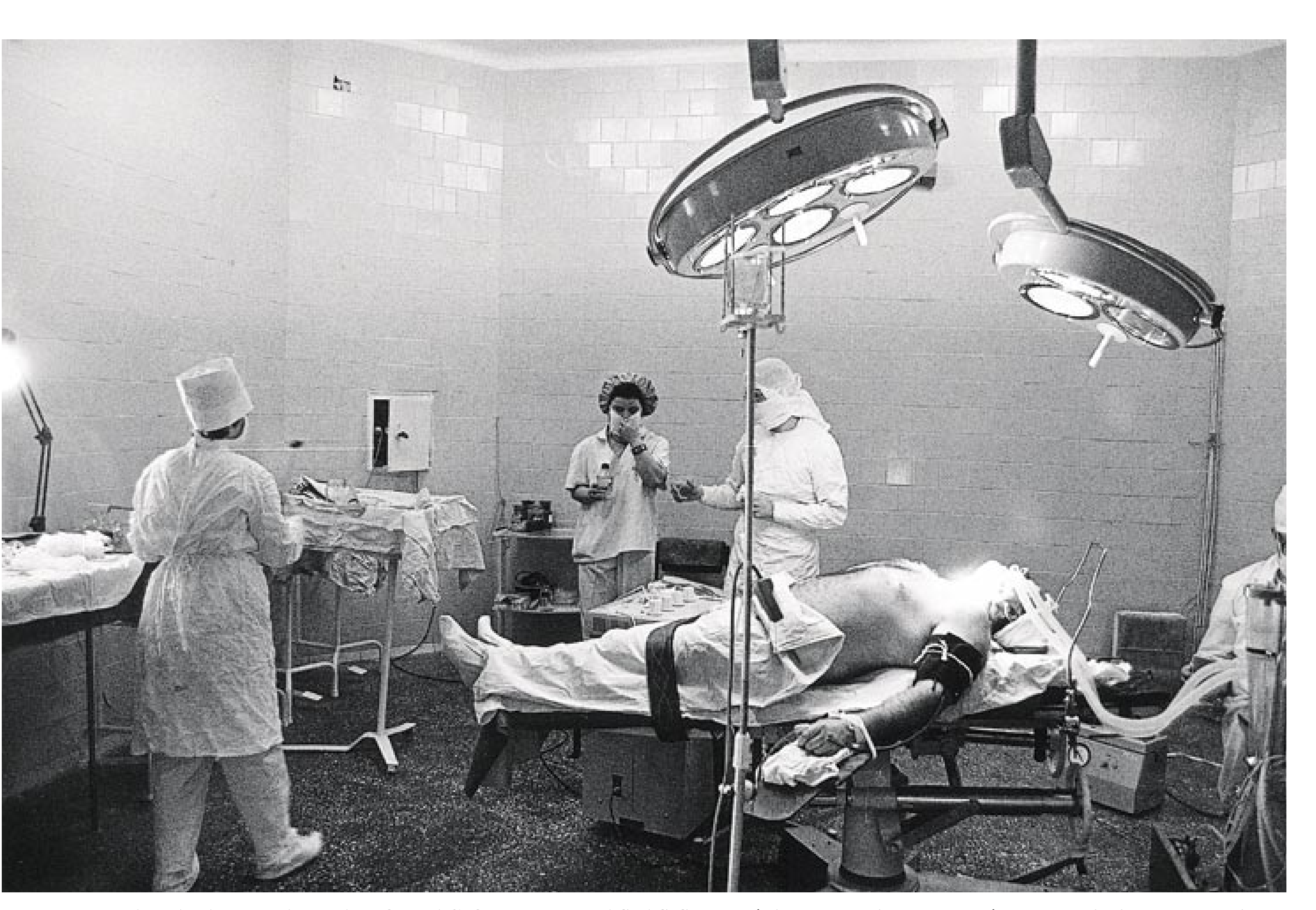
Los números hablan por sí mismos. Según los datos recopilados por Mykola D. Tronko y sus colegas, de Kiev, entre 1981 y 1985 —antes del accidente— el número de cánceres de tiroides en Ucrania era de unos cinco anuales. Cinco años después del desastre era de 22 al año, y entre 1992 y 1995 el promedio anual fue de 43. De 1986 a finales de 1995 se registraron 589 casos de cáncer de tiroides de niños y adolescentes. (En Bielorrusia la incidencia es aún mayor.) La tasa global del cáncer de tiroides infantil en Ucrania decuplica los niveles previos al accidente y es ahora de más de cuatro casos por millón. Este cáncer forma metástasis fácilmente, pero si se le detecta a tiempo se cura extirpando la glándula. Los pacientes tienen entonces que recibir un tratamiento de por vida que les aporte hormonas tiroideas.

Otra investigación, realizada por expertos ucranianos e israelíes, ha hallado que uno de cada tres liquidadores —sobre todo hombres de treinta y tantos años— ha padecido problemas sexuales o relacionados con la reproducción: impotencia, anomalías del fluido espermático y merma de la capacidad fecundante de los espermatozoides. Han crecido los embarazos con complicaciones entre las mujeres que viven en las áreas afectadas, y muchos chicos y chicas padecen un temor fóbico a la radiación.

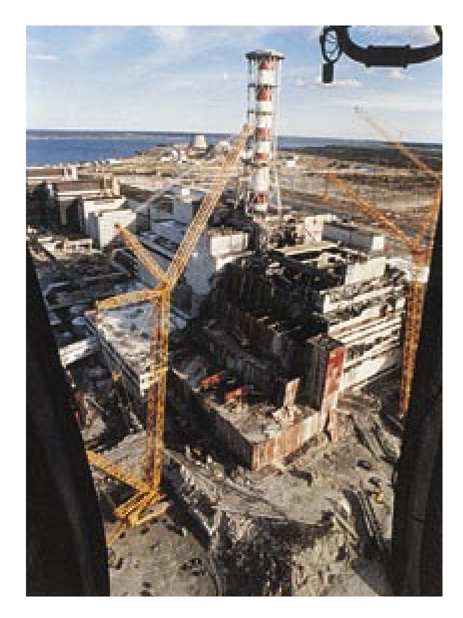
Se ha demostrado, pues, que los optimistas que predijeron la inexistencia de consecuencias médicas de la explosión a largo plazo se equivocaron de plano. Estas autoridades eran en su mayoría los responsables sanitarios de la extinta Unión Soviética y seguían un guión escrito por el buró político del Comité Central del Partido Comunista. Pero había también algunos especialistas en energía nuclear occidentales.

Cierto es que las previsiones de los "catastrofistas" —algunos de los cuales predijeron que el número de casos de cáncer superaría con creces los 100.000— no se han cumplido. Con todo, la experiencia previa sobre los efectos a largo plazo de la radiación — procedente de los estudios efectuados en Hiroshima y Nagasaki— indica que las pérdidas humanas seguirán creciendo. Pueden pasar muchos años antes de que los cánceres causados por la radiación se manifiesten; las perspectivas para la salud de los niños en las regiones de radiación muy alta son, por desgracia, sombrías.

El silencio sobre el peligro de la radiación en la propaganda soviética ha producido el efecto contrario al que se pretendía. La gente vive con un estrés continuo, asustada por su salud y, sobre todo, la de sus hijos. Este trauma mental ha generado un síndrome psicológico comparable al sufrido por los veteranos de las guerras de Vietnam y Afganistán. Entre los niños evacuados de la zona del reactor, la incidencia de trastornos



3. PARA EVITAR LA FORMACION DE METASTASIS, el paciente se somete a la extirpación quirúrgica de la glándula tiroides. La operación, efectuada en la clínica oncológica del Instituto de Endocrinología de Kiev, es el único tratamiento del cáncer de tiroides. El paciente tendrá que tomar hormonas tiroideas durante el resto de su vida para reemplazar las que ya no se sintetizarán en su organismo.




4. EL REACTOR INCENDIADO fotografiado desde el aire no mucho después del desastre (*izquierda*). Se construyó apresuradamente un "sarcófago" de hormigón y acero (*derecha*) para confinar los peligrosos radioisótopos; en estos momentos se está deteriorando a un ritmo alarmante. Un consorcio internacional propone que se lo rodee con una estructura más fuerte, pero su construcción, que duraría cinco años, costaría unos 40.000 millones de pesetas.

neuropsiquiátricos se ha multiplicado de 10 a 15 veces.

La catástrofe y el éxodo consiguiente de grandes poblaciones han causado también un daño irreparable a la rica diversidad étnica de las zonas contaminadas, en especial a los llamados *drevlyany* ("gentes de los bosques") y *polishchuks*, habitantes de la región de Polissya. Se han perdido sus peculiaridades arquitectónicas y otros productos de su cultura espiritual y material con la degradación de las ciudades y pueblos abandonados. Buena parte del hermoso paisaje es ahora inseguro para las personas.

El gobierno ucraniano, que debe afrontar una grave crisis económica, se ve obligado a gastar más del 5 por ciento de su presupuesto para paliar las consecuencias de Chernóbil. Con ese dinero se ofrece, entre otras prestaciones, alojamiento gratuito a unos tres millones de personas a las que se les ha reconocido oficialmente que fueron víctimas de la catástrofe (de ellas 356.000 liquidadores y 870.000 niños). Ucrania ha establecido un impuesto especial, igual al 12 por ciento de la renta, para recaudar los fondos necesarios, pero no está claro hasta cuándo podrá el gobierno mantener esas prestaciones a su nivel actual.

La zona de Chernóbil es hoy uno de los lugares radiactivos más peligrosos del mundo. Entre los escombros del reactor destruido hay decenas de miles de toneladas métricas de combustible nuclear con un nivel total de radiactividad de unos 20 millones de curies. El nivel de radiación en el reactor propiamente dicho, varios miles de roentgen por hora, es letal para toda forma de vida. Pero el peligro se extiende mucho más allá. En 30 kilómetros a la redonda hay unos 800 fosos de enterramiento, construidos deprisa y corriendo, donde, sin más, se han vertido en pozos de paredes de arcilla residuos muy radiactivos (árboles incluidos que habían absorbido radioisótopos de la atmósfera).

Puede que estos fosos expliquen la considerable contaminación de los sedimentos del río Dnieper y su afluente el Pripyat, que suministran agua a 30 millones de personas. Los sedimentos del Pripyat junto a Chernóbil contienen, se estima, 10.000 curies de estroncio 90, 12.000 de cesio 137 y 2000 de plutonio. Para evitar que los compuestos solubles sigan contaminando los manantiales hay que trasladar los residuos a instalaciones adecuadamente diseñadas y equipadas, y esas instalaciones aún no existen.

Los dos reactores que todavía funcionan en la central de Chernóbil plantean también un gran problema (un incendio dejó fuera de servicio un tercero en 1992). Generan el 5 por ciento de la energía de Ucrania; el sector nuclear produce en conjunto el 40 por ciento de la electricidad del país. Aun así, Ucrania y el Grupo de los Siete firmaron en diciembre de 1995 un acuerdo formal sobre un proyecto de cooperación para cerrar definitivamente la central de Chernóbil a lo largo del año 2000. El acuerdo establece que la Unión Europea y los Estados Unidos ayudarán a Ucrania a preparar planes que mitiguen los efectos del cierre en la población local. Prevé también mecanismos que permitirán a los países donantes acelerar la mejora de la seguridad de uno de los reactores aún en uso. Además, el acuerdo estipula la cooperación internacional para retirar de servicio la central y enfrentarse al mayor de todos los problemas: la sustitución duradera y ecológicamente adecuada del "sarcófago" que se construyó alrededor de las ruinas del reactor número cuatro.

El "sarcófago", de diez pisos de alto y paredes de más de seis metros de espesor, construido sobre todo con hormigón y grandes placas metálicas, se diseñó para que durase 30 años. Pero se edificó apresuradamente y en medio de una gran radiación. Por ello la calidad de la obra fue pobre, y la estructura necesita hoy una reparación inmediata. El metal empleado en el edificio se ha corroído y más de 1000 metros cuadrados de hormigón están muy agrietados. La lluvia y la nieve penetran en el interior. Si el "sarcófago" se derrumbase —lo que ocurriría si hubiese un terremoto—, los escombros liberarían, muy probablemente, grandes cantidades de polvo radiactivo.

En 1993 se celebró un concurso internacional para encontrar la mejor solución a largo plazo. Se escogieron, entre 94 propuestas, seis proyectos, y se los sometió a una evaluación

más detallada; al año siguiente se seleccionó un ganador: Alliance, un consorcio encabezado por Campenon Bernard, de Francia. Su propuesta, que consiste en la construcción de un "supersarcófago" alrededor del existente, une empresas de Francia, Alemania, Gran Bretaña, Rusia y Ucrania. El grupo ya ha realizado estudios de viabilidad. Si el proyecto sale adelante, el diseño costará de unos 2500 a cerca de 4000 millones de pesetas, y la construcción —en la que se invertirían cinco años— unos 40.000 millones de pesetas. La eliminación final de los residuos del accidente llevará 30 años, por lo menos. Una posibilidad que se estudia es encerrar los residuos en un cristal especial.

Chernóbil no fue un desastre más del estilo de los que la humanidad ha sufrido a lo largo de la historia, como incendios, terremotos o inundaciones. Es un suceso de nuevo cuño con repercusiones en toda la biosfera. Se caracteriza por la presencia de miles de refugiados medioambientales, por la contaminación duradera del suelo, el agua y el aire, y, posiblemente, por un deterioro irreparable de los ecosistemas. Chernóbil es una demostración de la amenaza siempre creciente de que la técnica se nos escape de las manos.

Los ingenieros que diseñaron la central, que no se atenía a las normas internacionales de seguridad, son, sin duda alguna, tan culpables como los técnicos encargados de su operación. El RMBK-1000 es una adaptación de un reactor militar ideado, en su origen, para producir el material de las armas nucleares. No había estructura de contención reforzada alrededor del reactor que limitase los efectos de un accidente. Debería alarmar que los reactores RMBK todavía funcionen en Ucrania, Lituania y Rusia.

El desastre refleja la enorme responsabilidad de los científicos y demás expertos que asesoran a los políticos en las cuestiones técnicas. La jefatura comunista de la extinta Unión Soviética debe compartir la culpa. A pesar de que por entonces el presidente Mikhail S. Gorbachov profesase el apoyo a la *glasnost*, o apertura, el régimen cerró hipócritamente filas tras la tragedia en un intento estéril, y en última instancia dañino, de minimizar el desastre ocurrido.

El suceso es una viva demostración de los fallos del monopolista sistema político y científico soviético. Aquel régimen concedía la mayor importancia al secreto y, para que la construcción fuese lo más barata posible, a la simplificación de las medidas de seguridad. Se despreció, simplemente, la experiencia internacional relativa a la seguridad de los reactores. La catástrofe subraya, además, el peligro que las centrales de energía nuclear pueden suponer donde haya guerra. Ni que decir tiene que en esas circunstancias son potencialmente vulnerables a los ataques terroristas.

Chernóbil le ha enseñado a todas las naciones una lección trágica acerca de la necesidad de estar preparados si hemos de depender de la técnica nuclear. La humanidad perdió la inocencia el 26 de abril de 1986. Nos hemos embarcado en una nueva era, la era pos-Chernóbil, y aún no hemos captado todas sus consecuencias.



5. CIUDAD FANTASMA: Pripyat, que fuera una dinámica ciudad de 45.000 habitantes, albergó a muchos de los trabajadores de la central de Chernóbil. Se evacuó tras el accidente y sigue desierta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHERNOBYL: A DOCUMENTARY STORY. Iurii Shcherbak. Traducido al inglés por Ian Press. St. Martin's Press, 1989.

CHORNOBYL: LIVING WITH THE MONSTER. Mike Edwards, en *National Geographic*, vol. 186, n.º 2, págs. 100-115; agosto de 1994.

LA RADIACIÓN Y LA INMUNIDAD HUMANA [en ruso]. Sergei Komissarenko. Naukova Dumka, Kiev, 1994.

CARING FOR SURVIVORS OF THE CHERNOBYL DISASTER: WHAT THE CLINICIAN SHOULD KNOW. Armin D. Weinberg et al., en *Journal of the American Medical Association*, vol. 274, n.º 5, págs. 408-412; 2 de agosto de 1995.

Elementos transponibles de *Drosophila*

Los elementos transponibles, secuencias discretas de ADN que parasitan el genoma de los seres vivos, pueden convertirse en partículas infectivas en ciertos ambientes moleculares

Rosa de Frutos

La ciencia crea sus propios mitos. Pero la ciencia los aniquila también. Durante mucho tiempo se admitió que la secuencia nucleotídica de la cadena del ADN era estable. Hasta que se descubrió que había segmentos móviles, que iban de un sitio a otro del genoma, capaces de producir grandes beneficios o grandes males. Hablamos de los transposones.

Estas secuencias discretas de ADN constituyen unidades estructurales que pueden replicarse y propagarse por el genoma. Pese a no tener en principio capacidad infectiva, se comportan como verdaderos parásitos intracelulares. Fueron descubiertos por Barbara McClintock hace casi cincuenta años a través de experimentos genéticos y citogenéticos en el maíz. Los denominó *elementos controladores*, en atención a su capacidad de modificar la expresión de los genes en los que se insertan.

Sin embargo, la detección de los elementos transponibles, la identificación de sus tipos y estructuras, la demostración de su presencia ubicua en procariotas y eucariotas y la comprobación de su poder mutagénico no se alcanzarían hasta los años ochenta, con el advenimiento de una poderosa herramienta de trabajo: la ingeniería genética.

Se han descrito distintos tipos, o familias, de transposones que difieren en su estructura y mecanismo de movilización. En los organismos eucariotas, las familias se integran, a su vez, en dos grandes grupos, clase I y clase II. Los elementos móviles de la familia de clase I, o retrotransposones, se movilizan a través de ARN. Los de clase II saltan directamente a través de ADN. La mayoría de las familias que se conocen pertenecen al grupo de los retrotransposones.

El número de copias de cada familia presente en el genoma de una especie varía de unos individuos a otros y de unos tipos de elementos móviles a otros. Por ejemplo, en los mamíferos la familia *LINE* comprende unas 10^5 copias por genoma, mientras que en el género *Drosophila* ninguna de las familias descritas supera los 100 elementos por genoma.

Para determinar el número de copias de un transposón se recurre a la hibridación *in situ*. Este método consiste en hibridar una sonda de ADN, marcada de antemano, con la secuencia cromosómica. La sonda consta de secuencias de un transposón marcado con isótopos radiactivos, tritio por lo común (H_3), o al que se han fijado biotina o digoxigenina. En el caso de *Drosophila* el método de hibridación resulta muy eficaz, pues este género de dípteros presenta cromosomas politénicos, gigantes, que permiten ver representados en bandas característicos el número y localización de los distintos elementos móviles.

El número de elementos por familia no supera nunca cierto límite, impuesto quizá por el compromiso entre la capacidad expansiva del transposón en el huésped y la alteración que puede provocarle. Los transposones carecen, en general, de especificidad de sitio para su integración, es decir, se movilizan de manera aleatoria en regiones intergénicas e intragénicas (intrones y exones) o reguladoras de los genes. Una propagación ilimitada de los transposones en el genoma del huésped podría crear un lastre insoportable para la especie.

Una misma familia de elementos móviles puede colonizar el genoma de diferentes especies; además, el grado de dispersión de una familia es muy variable. La familia de elementos *I* (pertenecientes a la clase I) se encuentra circunscrita al genoma de *Drosophila melanogaster* y especies próximas, pero no se han descubierto secuencias homólogas a estos elementos fuera de dicho grupo. Otros transposones parecen mostrarse menos exclusivistas y se dan en grupos taxonómicamente muy alejados; ocurre así en la familia de elementos *mariner* (perteneciente a la clase II), descrita en drosofílidos y en lepidópteros, en hongos, en *Dugesia tigrina* (una planaria) y en *Caenorhabditis elegans* (un nemátodo).

No es infrecuente la situación opuesta, en que cohabiten distintas familias de elementos móviles en el genoma de una misma especie. En el hombre, por ejemplo, coexisten las familias *Alu*, *L1*, *THE* y otras, con un número muy elevado de copias. Hasta la fecha, el conjunto de transposones mejor conocido nos lo ofrece el genoma de *Drosophila melanogaster*, con más de 50 familias de elementos móviles, lo que representa un 10 % del ADN de la especie.

ROSA DE FRUTOS es catedrática de la Universidad de Valencia, donde dirige el grupo de genética molecular. Ha trabajado en el análisis de la evolución de especies europeas y americanas de *Drosophila*, mediante técnicas citogenéticas y moleculares. Ultimamente su campo de investigación se ha centrado en el análisis molecular de los elementos transponibles de dípteros de ese género. La autora agradece la ayuda prestada en la elaboración de este artículo por M.ª José Martínez-Sebastián, Lluis Pascual, Trini Alberola, David Blesa, M. Ibo Galindo, Javier García, M.ª Dolores Moltó, Nuria Paricio y Manuel Pérez.

FAMILIAS DE ELEMENTOS TRANSPONIBLES DESCRITAS EN ESPECIES DE *DROSOPHILA*

ELEMENTO	TAMAÑO	NUMERO APROXIMADO DE COPIAS	REPETICIONES TERMINALES	GENES EN EL MODULO CENTRAL	ESPECIE
Clase I					
B104 (roo)	8,7	80 a 100	LTR	*gag/pol/env*	*D. melanogaster*
BS	5,1	5 a 15	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
blood	7,4	9 a 15	LTR	—	*D. melanogaster*
copia	5,1	100	LTR	*gag/pol*	*D. melanogaster*
412	7,6	15 a 40	LTR	*gag/pol/env*	*D. melanogaster*
17,6	7,4	40	LTR	*gag/pol/env*	*D. melanogaster*
1731	4,6	10 a 15	LTR	*gag/pol*	*D. melanogaster*
297	7,0	30	LTR	*gag/pol/env*	*D. melanogaster*
Doc	4,7	50 a 100	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
F	4,8	50 a 100	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
G	4,3	10 a 20	No	*gag/pol/*	*D. melanogaster*
gypsy (mdg4)	7,3	10	LTR	*gag/pol/env*	*D. melanogaster*
H.M.S. Beagle	7,3	50	LTR	—	*D. melanogaster*
Het-A	6,0	—	No	*gag*	*D. melanogaster*
I	5,4	1 a 10	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
jockey	5,0	50	No	—	*D. melanogaster*
LOA	7,7	—	No	*gag/pol/*	*D. silvestris*
mdg1	7,3	25	LTR	*gag/pol*	*D. melanogaster*
mdg3	5,4	15	LTR	—	*D. melanogaster*
micropia	5,5	12	LTR	*gag/pol*	*D. hydei*
R1	0,5-5,0	—	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
R2	0,5-5,0	—	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
Springer	8,8	6	LTR	—	*D. melanogaster*
Stalker	7,2	5 a 50	LTR	—	*D. melanogaster*
TART	4,0-10,6	—	No	*gag/pol*	*D. melanogaster*
Tirant	5,7	3 a 11	LTR	—	*D. melanogaster*
tom	7,0	—	LTR	*gag/pol/env*	*D. anannasae*
3S18	6,5 a 7,3	15	LTR	—	*D. melanogaster*
TRIM	3,1	25	No	*gag/pol*	*D. miranda*
Ulysses	10,6	15 a 20	LTR	*gag/pol*	*D. virilis*
Clase II					
Bari-1	1,7	5 a 10	RI	*trans*	*D. melanogaster*
FB	0,1 a 4,5	40	LRI	—	*D. melanogaster*
Hb1	15	20	RI	*trans*	*D. melanogaster*
hobo	3,0	0 a 600	RI	*trans*	*D. melanogaster*
mariner	1,3	30 a 50	RI	*trans*	*D. mauritiana*
Minos	1,7	5 a 30	LRI	*trans*	*D. hydei*
P	2,9	0 a 100	RI	*trans/rep*	*D. melanogaster*
Uhu	1,6	150	RI	*trans*	*D. heteroneura*

Otros elementos
aurora, Bilbo, BS, Bungy, Burdock, Calypso, D, Delta 88, flea, GEM, Harvey, hopper, Hércules, Isadora, Kermit, M4, mdg2, NEB, Nijinski, opus, Osvaldo, Penélope, prygun, Pogo, roamer, S, Scythian, TRAM, U28T2

El tamaño se da en kilobases (kb). El número de copias se refiere a las localizadas en la eucromatina. Las repeticiones terminales pueden ser: LTR (repeticiones terminales largas), RI (repeticiones invertidas), LRI (repeticiones invertidas largas). Genes del módulo central de clase II: trans *(transposasa) y* rep *(represor)*

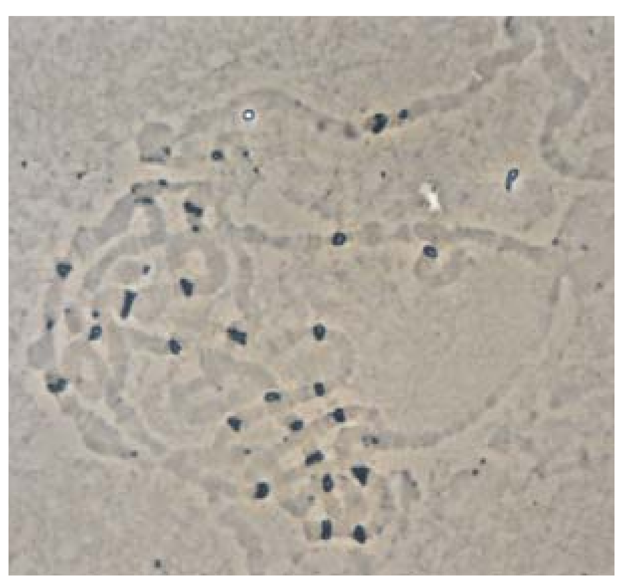
1. LOS TRANSPOSONES son secuencias discretas de ADN que forman unidades estructurales. Pueden replicarse y propagarse por el genoma. Se comportan, además, como verdaderos parásitos intracelulares.

Aunque se han diseñado diversas estrategias para aislar los transposones, la mayoría de los descritos en *D. melanogaster* se descubrieron por azar en el proceso de secuenciación de determinados genes. Normalmente, el autor o autores del hallazgo han asignado al nuevo transposón un nombre propio, más o menos ingenioso, si bien ha primado la referencia a su naturaleza migratoria: *gypsy* (gitano), *hobo* (vagabundo), *mariner* (marinero), *Ulysses*, etcétera.

La mayoría de los elementos detectados en *D. melanogaster* pertenecen a la clase I. Dentro de ésta se encuentran dos grandes grupos de elementos móviles identificables por su estructura y posible origen evolutivo: los retrotransposones con repeticiones terminales largas (LTR) y retrotransposones sin repeticiones terminales. Los retrotransposones con LTR guardan una relación estrecha con los retrovirus, con los que comparten un módulo central flanqueado por dos repeticiones terminales largas. En el módulo central llevan varios genes cuyos productos son indispensables para su propia transposición. Algunas de estas familias de retrotransposones —*copia, 1731 o mdg1*— portan en el módulo central los genes *gag* y *pol*,

homólogos a los encontrados en retrovirus; tales genes cifran las proteínas gag y pol, implicadas, respectivamente, en la formación de partículas similares a virus (VLP) y en la transcripción inversa, es decir, en la transcripción de una secuencia de ADN a partir de otra de ARN.

Los retrovirus presentan, además, un tercer gen, el *env*, cuya proteína forma parte de la cápside, o cubierta, que el virus necesita para su fase extracelular. La mayoría de los retrotransposones de *D. melanogaster* carecen de este gen. No tienen, pues, capacidad infectiva. Sin embargo, la familia de elementos móviles *gypsy* y algunos de los pertenecientes a la superfamilia formada por transposones similares a *gypsy* —piénsese, por ejemplo, en *B(104), 412* y *17,6*—, llevan en su módulo central un tercer gen, homólogo a *env*, que bajo ciertas condiciones cifra una proteína env funcional; en razón de ello, podrían en principio ser infectivos. Muy próximos desde el punto de vista evolutivo, los retrovirus difieren de los retrotransposones por su capacidad infectiva. Aunque esa línea divisoria se torna a veces borrosa, según veremos.



2. EL ADN PURIFICADO del retrotransposón 412 unido a una molécula de un marcador (en este caso, digoxigenina) hibrida con las regiones de los cromosomas donde encuentra secuencias homólogas. Mediante colorimetría se revelan los puntos donde se aloja la digoxigenina, identificados por bandas azules.

Vayamos con el segundo grupo de la clase I: los retroelementos sin repeticiones terminales. Portan en su extremo 3′ una cola de adeninas e información para dos genes homólogos a los genes *gag* y *pol*. Se trata de transposones cuya estructura y función se asemejan a las características de la familia *LINE*, de mamíferos; en razón de este hecho se habla a veces de la superfamilia de similares a *LINE*. Ahora bien, mientras que en mamíferos el número de copias por genoma haploide es muy alto, del orden de 10.000 copias, en *D. melanogaster* el número de miembros de cada familia no supera el centenar.

Los transposones de clase II suelen presentar repeticiones terminales invertidas, de 10 a 200 pares de bases. Determinan al menos una proteína, la transposasa, una enzima indispensable para la transposición o, para ser más precisos, imprescindible para la integración del elemento en el genoma del huésped. En algún caso, como en los llamados transposones *P*, codifican incluso un represor, una proteína que impide la transposición. No abundan en *D. melanogaster* las familias de transposones de esta clase, por la presumible razón de que el mecanismo de transposición directa de ADN a través de ADN sea más restrictivo que el mediado a través de ARN.

Escasea la información en cuanto salimos de *D. melanogaster*. Sólo se conoce la estructura molecular de algún transposón por especie: *micropia* en *D. hydei*, *Ulysses* en *D. virilis*, *tom* en *D. anannasae*, *mariner* en *D. mauritiana*, y poco más. En *D. subobscura*, G. Marfany y R. González-Duarte, de la Universidad de Barcelona, aislaron el elemento *GEM*, que no es homólogo a ninguno de los retrotransposones descritos hasta el momento. A partir de esta misma especie nuestro grupo ha aislado y caracterizado *Bilbo*, que en algunas regiones presenta homología con *LOA* de *D. silvestris*.

Los genéticos disputan todavía sobre la función de los transposones. Se admite que son constituyentes intrínsecos del genoma, donde se sitúan más o menos aleatoriamente. Si se insertan en regiones codificantes pueden causar mutaciones e incrementan, por tanto, la variabilidad genética, sobre la que actuará la selección. En ese sentido son auténticos motores de la evolución. Se les ha considerado también agentes de la reconstrucción continua de las secuencias génicas. Estas hipótesis adolecen de un punto débil: si las mutaciones o reordenaciones genómicas inducidas por los elementos transponibles son deletéreas para el genoma receptor, no persistirán en genomas sometidos a selección natural. Bajo ese razonamiento hipotético y la propia objeción esgrimida subyace la idea, bastante extendida, de que en el genoma todo lo que no es gen es “basura”; en cuyo contexto, los elementos móviles ocupan un lugar preeminente de la parte obscura del genoma, sin una función clara o, en todo caso, negativa.

Contra esa apreciación comienza a perfilarse otra idea según la cual los elementos móviles formarían parte importante del genoma de los eucariotas. Se ha comprobado así que los retrotransposones *HeT-A* y *TART* de *D. melanogaster* intervienen en la continua reconstrucción de los extremos de los cromosomas (telómeros).

Cabe un tercer punto de vista, defendido por quienes sostienen que los elementos móviles no desempeñan ninguna misión en el genoma donde se insertan, sino que son formas o partículas autónomas. Los suponen parásitos celulares o moleculares. Quienes así opinan buscan apoyo en la estrecha relación filogenética entre familias de transposones y familias de virus. Si a los virus se les considera sistemas con entidad propia frente a las células donde se hospedan, hemos de conceder idéntica atribución a los transposones. Vendrían éstos a ser formas evolucionadas de virus que se han adaptado a la vida intracelular, o bien formas degeneradas de virus que han perdido la capacidad de infectar nuevas células.

En cualquier caso, la frontera entre virus y transposones que podría establecerse en la posesión o no, respectivamente, de una fase extracelular y en la capacidad infectiva de los primeros frente a la inanidad de los segundos, se tornó borrosa cuando comenzaron a aportarse pruebas de infecciones por transposones. A principio de los ochenta, M. G. Kidwell, de la Universidad de Arizona, daba a conocer que los elementos *P* invadían el genoma de *D. melanogaster*. La entrada masiva de estos transposones en el genoma producía lesiones que se reflejaban en el fenotipo de la mosca. El conjunto de estas lesiones, mutaciones y reordenaciones cromosómicas, se conoce con el nombre de disgénesis de los híbridos.

¿Qué condiciones deben concurrir para que un elemento móvil pueda invadir el genoma de una determinada especie? Las condiciones vienen impuestas por la estructura genética del transposón y por el entorno molecular que encuentra en la célula huésped. En el genoma de *D. melanogaster* coexisten dos tipos de elementos *P*: los elementos completos (autónomos) y los defectivos (no autónomos, que necesitan la ayuda de los elementos completos para su transposición). El elemento completo consta de 2,9 kilobases, está formado por un módulo central con cuatro exones y porta información para codificar la transposasa y la proteína represora. La primera enzima, de 87 kilodaltons, es imprescindible para la transposición del elemento; la segunda, de 66 kilodaltons, antagoniza la acción de la transposasa e impide el movimiento del elemento de un sitio a otro del genoma. Ambas proteínas se forman por corte y empalme alternativo a partir de un mismo ARNm.

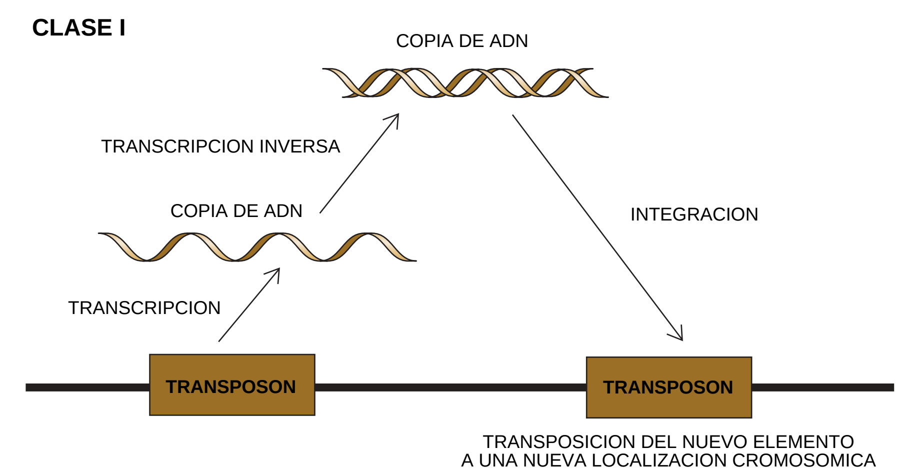
Sin embargo, no bastan esas dos proteínas para explicar la propagación masiva de elementos *P* en el genoma de *D. melanogaster*. Igual que los virus, los transposones recurren a la maquinaria celular del huésped para los procesos de transcripción, traducción, corte y empalme. Sin duda, los elementos *P* habrán sabido aprovechar tales mecanismos para su expansión; observamos, en efecto, que el mecanismo de corte y empalme alternativo que origina la transposasa o el represor es dependiente de tejido: la transposasa se produce en la línea germinal y el represor en la línea somática. La transposición en la línea germinal asegura el paso de los elementos a los descendientes, y la restricción en la línea somática garantiza el control del daño que puede inferir en los individuos portadores.

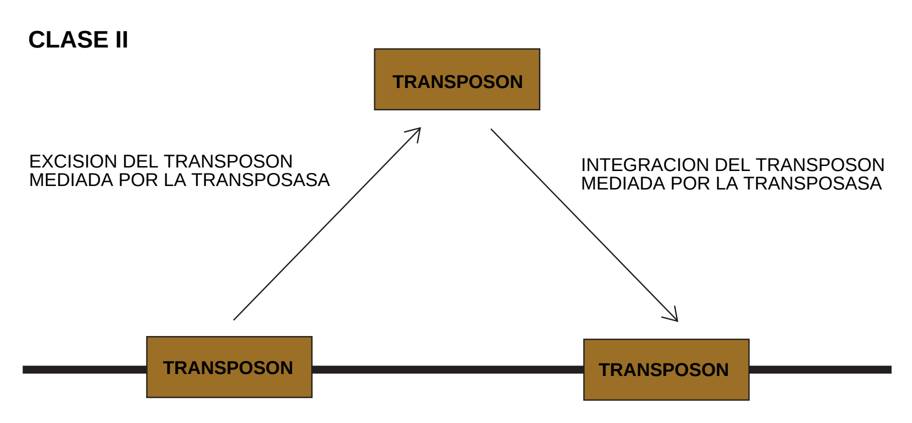
¿De dónde proceden los elementos *P*? ¿Cómo se introdujeron en el genoma de *D. melanogaster*? ¿Invaden otras especies del mismo género? El grupo de M. Kidwell ha obtenido pruebas que permiten contestar con bastante seguridad las dos primeras preguntas. En primer lugar, los elementos *P* que han invadido el genoma de *D. melanogaster* provendrían, por transmisión horizontal, de *D. willistoni*. En segundo lugar, la transferencia pudo venir mediada por ácaros. Kidwell ha demostrado que *Proctolaelaps regalis*, ácaro parásito que convive con poblaciones de *Drosophila*, puede transportar secuencias de elementos *P* de individuos de una especie de *Drosophila* a los de otra.

Para averiguar si los elementos *P* invaden especies de *Drosophila* distintas de las dos mencionadas, nuestro laboratorio inició la búsqueda de secuencias homólogas de esos transposones en especies del grupo *obscura*, en particular en *D. subobscura*. Mediante hibridación en filtro confirmamos dicha presencia en el grupo *obscura*. Esta técnica permite detectar la presencia de una determinada familia de elementos, pero nada revela sobre su estructura molecular. Por ello se procedió al aislamiento, clonación y secuenciación de elementos homólogos de *P* a partir de una genoteca de *D. subobscura*. Descubrimos que los elementos *P* integrados en el genoma de *D. subobscura* poseen unas características insólitas. Por ejemplo, la mayoría de las copias se alojan en un sola región eucromática, la región 85DE del cromosoma O. (Por contra, las demás familias de transposones poseen numerosas copias que se distribuyen a lo largo de los brazos cromosómicos.)

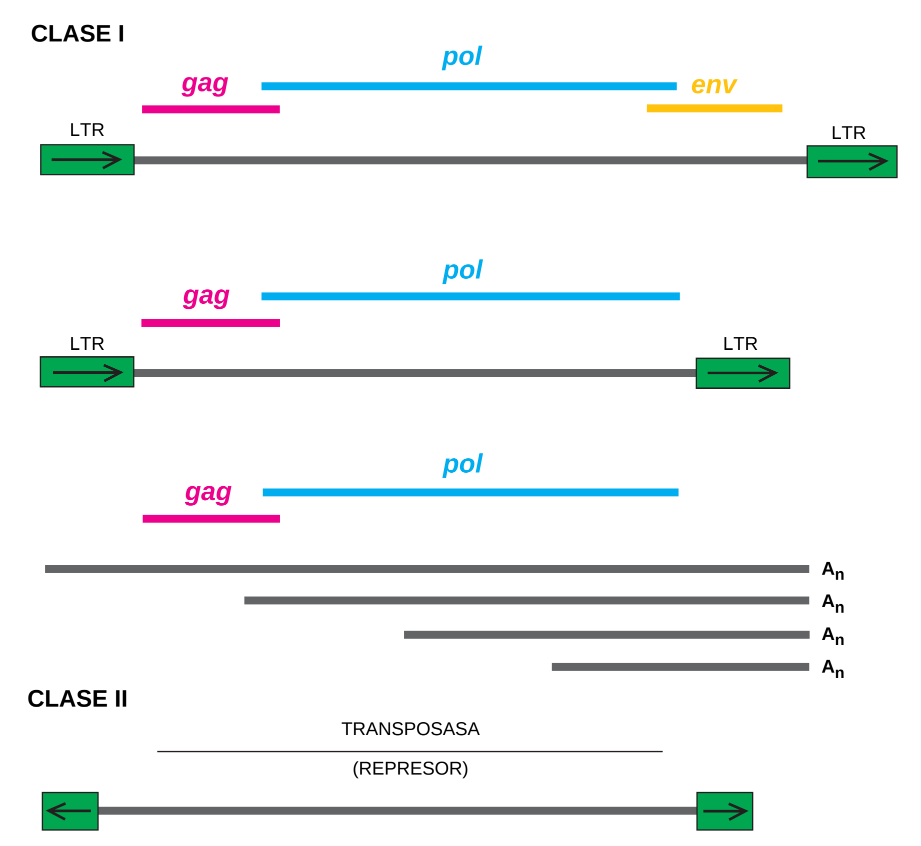
Procedimos al análisis molecular de la región 85DE del transposón *P*. Vimos que había varias unidades en tándem. Con una singularidad: cada unidad del tándem estaba truncada. La secuencia truncada carecía de las repeticiones terminales y del extremo 3′ de la secuencia codificadora. A la pérdida de este fragmento se debe que la unidad repetitiva mantenga intacta la capacidad para codificar la proteína represora, mientras que ha perdido la capacidad de sintetizar transposasa. El truncamiento en el extremo 5′ implica también la pérdida de la región promotora del elemento *P*.

El análisis molecular reveló algo más. Curso arriba del punto de inicio de la transcripción había una región de 400 pares de bases que presentaba las secuencias típicas de un promotor de eucariotas. El rastreo de secuencias homólogas a las de esa región en los bancos de datos nos llevó a dos secuencias cortas, una homóloga a una región del elemento *GEM* de *D. subobscura* y otra homóloga a una región del elemento





3. LOS ELEMENTOS TRANSPONIBLES de eucariotas se agrupan en dos categorías de acuerdo con su mecanismo de transposición. Los elementos de la clase I, o retrotransposones, saltan por el genoma a través de un paso intermedio, esto es, mediante ARN y con intervención de la enzima transcriptasa inversa. Los elementos de la clase II se transponen directamente de un sitio cromosómico a otro mediante otra enzima, la transposasa.



4. ELEMENTOS DE LA CLASE I (*arriba*). Lo mismo que los retrovirus, estos retrotransposones pueden estar flanqueados por repeticiones terminales largas (LTR) y llevar información para los genes *gag*, *pol* y ocasionalmente *env*. Pueden también carecer de LTR, llevar en su extremo 3′ una cola polinucleotídica de adenina, presentar un fenómeno de truncación en su extremo 5′ y portar información para los genes *gag* y *pol*. Los elementos de la clase II (*abajo*) llevan información para la transposasa y, a veces, para una proteína represora.

TRIM de *D. anannassae*. La similar a *GEM* constaba de 192 pares de bases e incluía una caja CAAT y otra CG, además de un octámero (ATTTGCAT). La secuencia similar a la región *TRIM* consta de 179 pares de bases y abarca la caja TATA.

En resumen, la unidad repetitiva del tándem que aparecía en la región 85DE de *D. subobscura* constituía un mosaico formado por la yuxtaposición de tres fragmentos, quizá tres restos de transposones. En conjunto, los tres originaban una nueva unidad de transcripción: la región promotora integrada por cortas secuencias de *GEM* y *TRIM* y la región codificante procedente del elemento *P*.

La estructura atípica de los elementos *P* en *D. subobscura* planteaba nuevas cuestiones. ¿Se trata de copias carentes de función, procedentes de elementos *P* que antaño sí cumplían alguna? ¿Para qué sirven? ¿Se dan en otras especies de *Drosophila*?

Empecemos por la última cuestión. W. Miller y W. Pinsker, de la Universidad de Viena, habían encontrado una agrupación similar de repeticiones truncadas en *D. guanche*. Nuestro propio grupo ha detectado también su presencia en *D. madeirensis*. Ambas especies se hallan, desde el punto de vista filogenético, muy próximas a *D. subobscura*. Suponemos que esta agrupación de elementos *P* se hallaría ya en una especie ancestral, anterior a la separación evolutiva de las tres especies citadas.

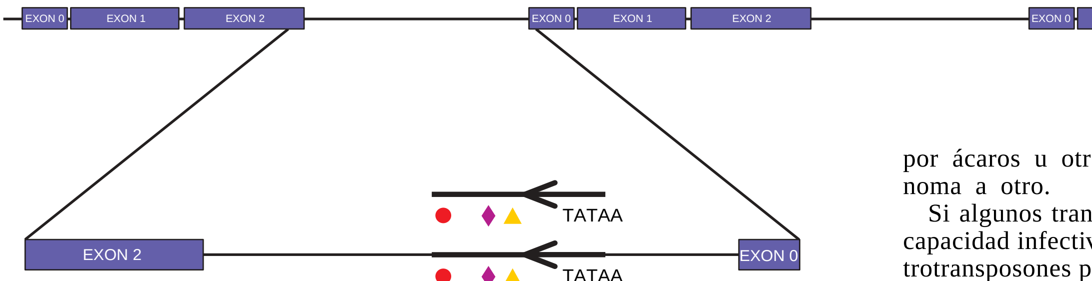
La carencia de repeticiones terminales y la incapacidad de sintetizar transposasa convierten a los elementos *P* de la región 85DE en elementos inmóviles. Sí retienen, no obstante, la capacidad de sintetizar una proteína represora. Sabido es que, en los transposones *P* que se mueven por el genoma, compete a la proteína represora restringir dicha movilidad mediante la inhibición de la acción de la transposasa; pero cuando los elementos *P* no sintetizan esta enzima, ¿qué función hemos de reconocerle a la proteína represora?

Se nos ocurrió pensar que, en el genoma de *D. subobscura*, el represor podría impedir la integración y propagación de transposones procedentes de otras especies, constituyendo así una suerte de sistema inmunitario frente a potenciales invasores. Para someter a prueba tal hipótesis, debíamos demostrar primero que las unidades repetitivas del tándem intervenían en la transcripción del material genético y en la traducción de éste a proteínas. Confirmada su participación, había que demostrar luego que la proteína sintetizada poseía capacidad represora.

Para demostrar la actividad transcripcional de las copias en tándem recurrimos a un experimento sencillo. A partir de ARN extraído de individuos adultos de *D. subobscura* se construyó una genoteca de ADN complementario (ADNc) de dicho ARN. En el rastreo de la genoteca, y utilizando como sonda una de las copias del tándem, se aislaron y secuenciaron distintos clones de la muestra. La secuenciación demostró que se trataba de ARN mensajeros provenientes de los elementos *P* truncados. Posteriormente, mediante hibridación en filtro de proteínas procedentes de distintos estadios del desarrollo, detectamos la existencia de una proteína de 66 kilodaltons, el tamaño esperado. Los elementos *P* truncados de *D. subobscura* eran, pues, genéticamente activos, es decir, sintetizaban proteínas.

Para responder a la cuestión de si la proteína sintetizada mantiene la función represora, acometimos distintos experimentos de transformación. En *Drosophila*, el proceso de transformación consiste en introducir secuencias de ADN en embriones mediante microinyección. Para que la transformación sea estable, el ADN no sólo debe llegar al interior de las células, sino que ha de integrarse también en el genoma. Observamos que los elementos *P* completos microinyectados en embriones de *D. melanogaster* que carecían de estos transposones se integraban y transponían en el genoma de esta especie; en cambio, no ocurría tal cuando se trataba de transformar embriones de *D. subobscura* con elementos *P* de *D. melanogaster*.

Parecía, en el segundo caso, que el represor podría impedir la integración y multiplicación en el genoma de *D. subobscura* de elementos *P* activos. Para averiguarlo, optamos por un ensayo inverso al anterior. Y así introdujimos elementos *P* truncados de *D. subobscura* en el genoma de *D. melanogaster* para comprobar si disminuía la capacidad de transposición de los elementos *P* completos. Se realizaron las construcciones correspondientes y se procedió a la transformación y seguimiento de las líneas transformadas.



5. AGRUPACION EN TANDEM de los elementos *P* de *D. subobscura* en la región cromosómica 85DE. Cada unidad repetitiva está formada por una región codificadora que contiene los exones 0, 1 y 2 del elemento *P*, y una región promotora con secuencias homólogas a los elementos GEM (*flecha*), que contiene la caja TATA, y a los elementos TRIM (*barra*), que contiene los motivos CAAT●, el octámero ATTTGCAT♦, y una caja GC▲.

Para detectar la capacidad de transposición de *P* en una determinada línea, utilizamos por marcador fenotípico el gen *white* (ojos blancos); ello nos permitía seguir los sucesos de transposición a través de la aparición de individuos con ojos en mosaico, blancos y rojos. Hasta ahora, los resultados han sido negativos: no hemos conseguido probar que la proteína de 66 kilodaltons codificada por los transposones *P* truncados de *D. subobscura* cumpla una función represora.

Nada impide que la proteína sintetizada ejerza una nueva función, aunque desconozcamos su naturaleza. No sería el primer caso en que el genoma del huésped ha instrumentalizado la información genética de un elemento transponible; por ejemplo, los elementos *HeT-A* y *TART* de *D. melanogaster* desempeñan la misión de mantener la integridad de los telómeros. Cabe, pues, que el mosaico formado por la unidad repetitiva de la región 85DE esté implicada en una nueva función biológica.

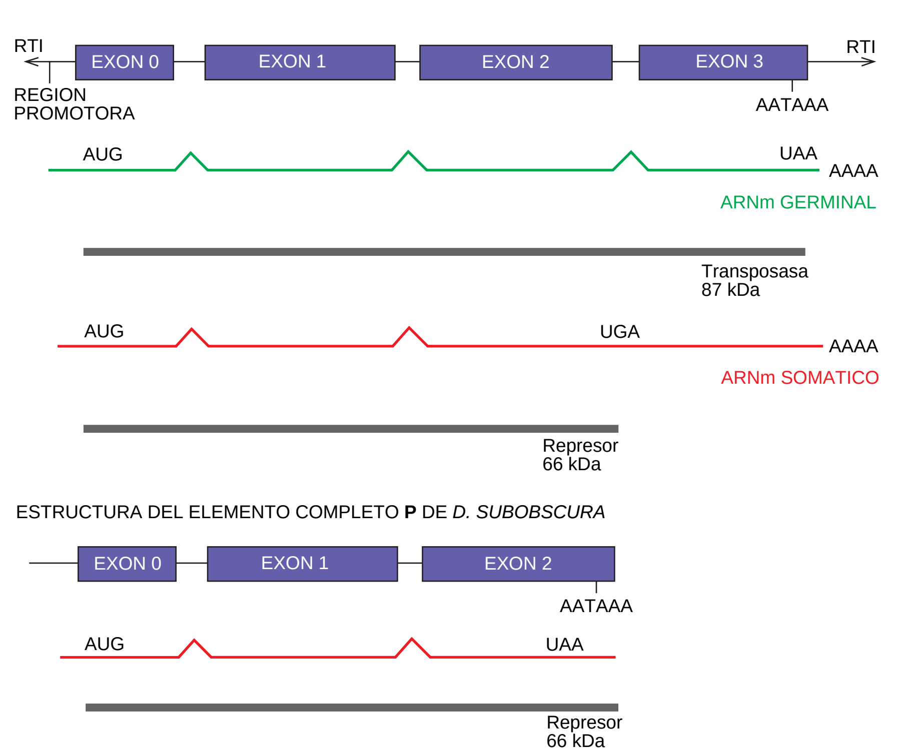
Existe en el genoma de *D. melanogaster* otro transposón de tamaño y estructura similares a *P*. Nos referimos a *hobo*. G. Periquet, de la Universidad de Tours, y Ll. Pascual, de nuestro grupo, propusieron, fundados en estudios poblacionales, que el elemento *hobo*, al igual que *P*, invadía las poblaciones de *D. melanogaster*. Nos propusimos reproducir en el laboratorio la invasión del genoma de *D. melanogaster* por *hobo*. Para ello microinyectamos el transposón en moscas de esta especie que carecían del mismo.

Mediante hibridación en filtro e hibridación *in situ* se analizó el número y localización de *hobo* en las distintas líneas transformadas. Luego recurrimos al test de funcionalidad para conocer la evolución en la capacidad de inducir o reprimir disgénesis de los híbridos a lo largo de las generaciones. Descubrimos así que el número y la capacidad funcional de *hobo* aumentaba con el tiempo, sin que llegara a estabilizarse transcurridas 90 generaciones. Se propaga, pues, con mayor lentitud que lo observado con el transposón *P*.

Sin embargo, ni el transposón *P* ni *hobo* son partículas infectivas por sí mismas. Para adquirir dicho carácter, han de sufrir una transferencia pasiva, por ácaros u otro vector, de un genoma a otro.

Si algunos transposones gozaran de capacidad infectiva, ésos serían los retrotransposones por poseer una estructura de retrovirus. Incluso alguno de ellos, como el retrotransposón *gypsy* de *D. melanogaster*, tiene idéntica organización que los retrovirus.

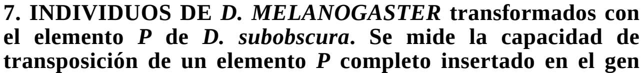
Durante años se ha venido creyendo que los elementos *gypsy* carecían de capacidad infectiva, como se supuso también que los retrovirus se circunscribían a los vertebrados. De ese error comenzamos a salir ahora. Recientemente, el grupo de A. Bucheton, del Centro de Genética Molecular de Gif-sur-Yvette, y el equipo de V. Corces, de la Universidad Johns Hopkins, han demostrado que el elemento *gypsy* detectado en el genoma de *D. melanogaster* (*gypsyDm*) presenta propiedades infectivas. Han comprobado que los elementos *gypsyDm* provenientes de una cepa de



6. ELEMENTO *P* DE *D. MELANOGASTER*. Consta de cuatro exones flanqueados por repeticiones terminales invertidas. En la línea germinal el procesado de los exones produce un ARN mensajero que cifra transposasa de 87 kilodaltons; esta proteína es necesaria para la transposición. En la línea somática se produce, por procesado alternativo, un ARN mensajero con una señal de parada que da lugar a una proteína de 66 kilodaltons, que induce la represión de la transposición. Los elementos *P* de *D. subobscura* carecen de repeticiones terminales y del exón 3. Sólo llevan información para el represor.





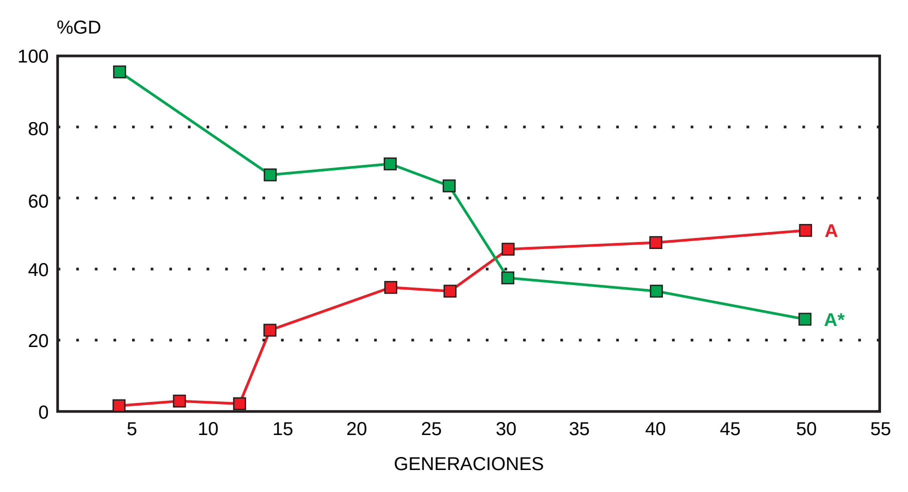


7. INDIVIDUOS DE *D. MELANOGASTER* transformados con el elemento *P* de *D. subobscura*. Se mide la capacidad de transposición de un elemento *P* completo insertado en el gen *white* (ojos blancos). La excisión somática de este elemento *P* da lugar a la recuperación del color normal (*rojo*), por lo que aparecen ojos en mosaico.

D. melanogaster portadora de retrotransposones activos pueden infectar cepas carentes de ellos, cual si se tratara de un virus.

Del análisis molecular de los elementos *gypsyDm* activos se desprende que la ORF3 (una ORF es una secuencia de ADN, comprendida entre un triplete de inicio y uno de terminación de la traducción, que potencialmente es un gen) posee características similares al gen *env* de retrovirus: corte y empalme diferencial de la ORF3 (imprescindible para la traducción de *env*), con el añadido de que la proteína env presenta las propiedades de la proteína de la cápside vírica. Ante tales peculiaridades, Bucheton y Corces proponen que *gypsyDm* constituye el primer retrovirus descrito en insectos.

Pero si es un retrovirus, ¿por qué no se han detectado "epidemias" de *gypsyDm* entre las poblaciones de *D. melanogaster* o en otras especies de *Drosophila*? Objeción que suele responderse afirmando que, en el seno del sistema formado por el parásito y el huésped, *Drosophila* ha generado mecanismos que frenan la propagación de *gypsyDm* en su propio genoma. Todo indica que existe un control genético de la capacidad de infección, ya que sólo los individuos homocigóticos para el gen mutante *flamenco* (*fla*) pueden dar lugar al corte y empalme diferencial que origina la variante genómica capaz de producir una secuencia *env* funcional. En ese contexto, los retrotransposones *gypsyDm* pasan a convertirse en partículas dotadas de capacidad infectiva y sometidas a un control riguroso por el genoma del huésped. Tendríamos, por consiguiente, que, a tenor de la composición genética del huésped, el retrotransposón *gypsyDm* podría comportarse bien como retrovirus bien como elemento transponible.



8. EVOLUCION DE LINEAS de *D. melanogaster* transformadas con el transposón *hobo*, cultivadas a 25 grados C. Se ha medido la progresión de la capacidad para provocar disgénesis en los híbridos (A) y para reprimir este síndrome (A*). La progresión está relacionada con el aumento del número de copias del transposón.

La demostración de la capacidad infectiva de *gypsyDm* nos obliga a replantear la evolución de esta familia de elementos entre las especies de *Drosophila*. Este retrotransposón es un componente habitual del genoma de esas especies. En nuestro laboratorio hemos comprobado, mediante las técnicas de hibridación en filtro y de reacción en cadena de la polimerasa, que hay secuencias homólogas a *gypsyDm* en todas las especies del grupo *obscura* que hemos estudiado. Pero, ¿mantienen estos elementos las características funcionales y estructurales de *gypsyDm*? En una primera aproximación, y apoyados en análisis de restricción, descubrimos que existían elementos potencialmente completos (de unas siete kilobases) en todas las especies del grupo *obscura*; además, en el caso de *D. subobscura* parecían ser móviles, pues presentaban patrones de restricción diferencial que dependían de la cepa analizada. Con todo, había que acometer un análisis exhaustivo de la secuencia de los distintos retrotransposones para conocer su estructura y potencial funcionalidad.

Aparte del elemento *gypsyDm*, sólo conocíamos la estructura molecular de un elemento *gypsy* de *D. virilis* (*gypsyDv*), especie perteneciente al grupo repleta. Lo había aislado el grupo de L. J. Mizrokhi, de los Institutos Nacionales de la Salud en

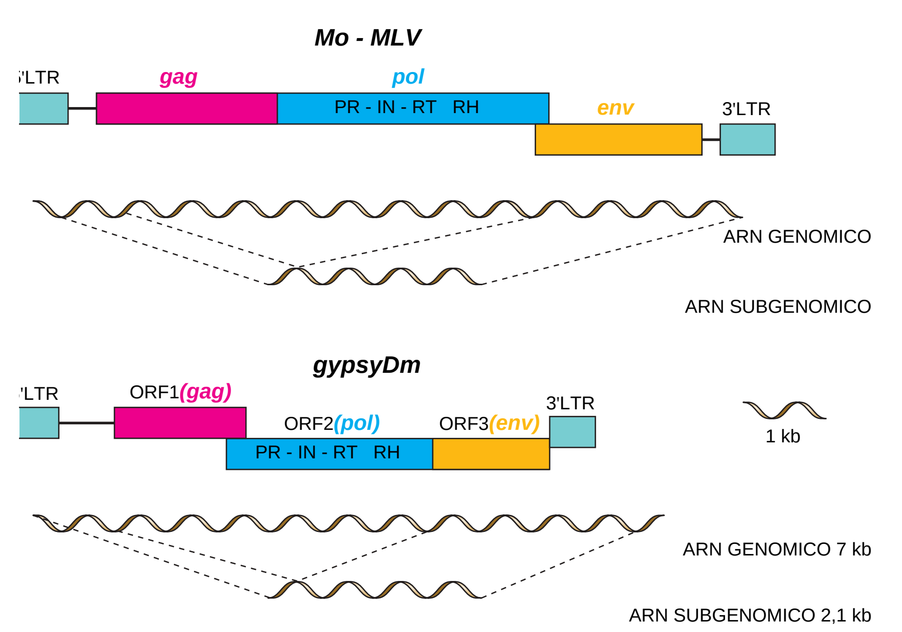
Bethesda. Nosotros nos valimos de una genoteca de *D. subobscura* para aislar un elemento de 7,5 kilobases que, por sus características estructurales y funcionales, parecía tener capacidad de transposición.

Del análisis comparativo entre las secuencias *gypsyDm*, *gypsyDv* y *gypsyDs* inferimos que los tres elementos mantienen una misma estructura y un mecanismo común de expresión.

Como ya hemos indicado, la capacidad infectiva que distingue a los retrovirus radica en la funcionalidad de la proteína codificada por el gen *env*. En *gypsyDm* la proteína env posee rasgos propios de una proteína de membrana funcional: dominio de péptido señal, dominio transmembrana, sitios de rotura y de glicosilación, así como varios residuos aminoacídicos de cisteína en determinada posición. El cotejo de los tres elementos *gypsy* demostró que las proteínas env de *gypsyDv* y *gypsyDs* carecen de dominios esenciales para su funcionalidad. A *gypsyDv* le falta el péptido señal y a *gypsyDs* el péptido señal y el dominio transmembrana.

A ese respecto, en estudios de hibridación en filtro detectamos en *D. subobscura*, además del esperado ARNm de unas 7 kilobases, una banda de 2,1 kilobases que, por tamaño, se corresponde con el ARNm originado por un proceso de corte y empalme diferencial y del cual se traduce el producto env. En el caso de *gypsyDv* y *gypsyDs* se conservan las señales para un corte y empalme correcto del gen *env*. Por tanto, aunque ambas secuencias presentan dominios funcionales degradados, siguen conservando mecanismos funcionales de corte y empalme. En resumen, la actividad de la proteína env avala la consideración retrovírica de la secuencia de *gypsyDm*, en tanto que los elementos *gypsyDv* y *gypsyDs* serían sólo retrotransposones.

El paso siguiente era el de averiguar sus formas ancestrales. Podría suponerse que *gypsyDv* y *gypsyDs* procedieran de la degeneración de partículas que antaño gozaron del poder infectivo de *gypsyDm*, que fueran vestigios de retrovirus funcionales. La pérdida de función se debería a inserciones, deleciones y cambios en la pauta de lectura que han conducido a la pérdida de los dominios esenciales de la proteína env. Pero tampoco podía descartarse que *gypsyDm* fuera un retrovirus de reciente evolución a partir de retrotransposones emparentados que hubieran adquirido la función env.



9. RETROTRANSPOSON *gypsyDm* (*gypsy* de *D. melanogaster*). Tiene una estructura similar a la de los retrovirus, en particular a la del virus de la leucemia en ratones. Las repeticiones terminales (LTR) flanquean un módulo central que codifica tres genes: *gag*, *pol* y *env*. Los dominios funcionales de la proteína pol están en el mismo orden: PR (proteasa), IN (integrasa), RT (transcriptasa inversa) y RH (ribonucleasa). En el retrovirus y en el retrotransposón se obtiene por transcripción un ARN genómico que abarca a los tres genes; por procesado alternativo se llega a un ARN subgenómico, que abarca sólo al gen *env*, necesario para la traducción correcta de la proteína env, indispensable en la fase extracelular de las partículas infecciosas.

En el genoma de *D. subobscura*, especie de amplia distribución, habíamos aislado secuencias *gypsyDs*. Podría ocurrir también que coexistieran en él distintos tipos de secuencias, incluidas las infectivas *gypsyDm*. Reunimos muestras de *D. subobscura* provenientes de toda su área de distribución. Buscamos la presencia de secuencias *gypsyDm* mediante la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa. Y encontramos que, en cinco poblaciones, aparecían elementos *gypsyDm*, además de *gypsyDs*. Ese fenómeno podría deberse a un proceso de transferencia horizontal de *gypsy* desde *D. melanogaster* hacia el genoma de *D. subobscura*.

De estos resultados no puede seguirse, sin embargo, que *gypsy* posea una gran capacidad infectiva. La mayoría de los retrovirus infectan a vertebrados y en éstos los síntomas de infección son evidentes, quizá porque no han desarrollado un sistema de control tan rígido como el de *Drosophila* respecto a *gypsy*.

A modo de recopilación podemos, pues, afirmar que los transposones encierran una capacidad infectiva, todo lo limitada que se quiera, que depende de las características moleculares y poblacionales del huésped. Obviamente, la potencialidad de infección, la capacidad de transferencia horizontal de un elemento transponible desde una especie hacia otra, depende de la proximidad física entre huéspedes. En los tres elementos examinados, *P*, *hobo* y *gypsy*, el díptero *D. melanogaster* interviene como dador o receptor. En la segunda mitad de este siglo la movilidad humana ha facilitado sin duda el intercambio y dispersión de las poblaciones de esa famosa mosca. Posiblemente la historia de la invasión propuesta para el transposón *P* como un hecho aislado y que parecía excepcional, sea un fenómeno general en la historia evolutiva reciente de cualquier elemento transponible.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DISTRIBUTION OF *HOBO* TRANSPOSABLE ELEMENTS IN NATURAL POPULATIONS OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*. L. Pascual y G. Periquet en *Mol. Biol. Evol.*, vol. 8, n.º 3, págs. 282-296, 1991.

LATERAL TRANSFER IN NATURAL POPULATIONS OF EUKARYOTES. M. G. Kidwell en *Annu. Rev. Genet.*, volumen 27, págs. 235-256, 1993.

MOLECULAR STRUCTURE OF A *GYPSY* ELEMENT OF *DROSOPHILA SUBOBSCURA* (*GYPSYDs*): IT CONSTITUTES A DEGENERATE FORM OF INSECT RETROVIRUSES. T. Alberola y R. de Frutos en *Nucleic Acids Research* (en prensa).

Fermat, demostrado al fin

La demostración del teorema de Fermat por Andrew Wiles se funda en una gavilla de métodos matemáticos que trastoca el paisaje de la teoría de números

Yves Hellegouarch

Pierre Fermat (1601-1655), hacia el fin de su vida, escribía en sus *Défis aux mathématiciens*: "Sabemos que Arquímedes no desdeñó trabajar en las proposiciones de Conón, que aun siendo verdaderas no habían sido demostradas, y las supo dotar de demostraciones de la más alta sutileza. ¿Por qué no habría yo de esperar una ayuda similar de las eminencias con que se cartea?, ¿por qué, a modo de Conón francés, no habría yo de encontrar Arquímedes ingleses?

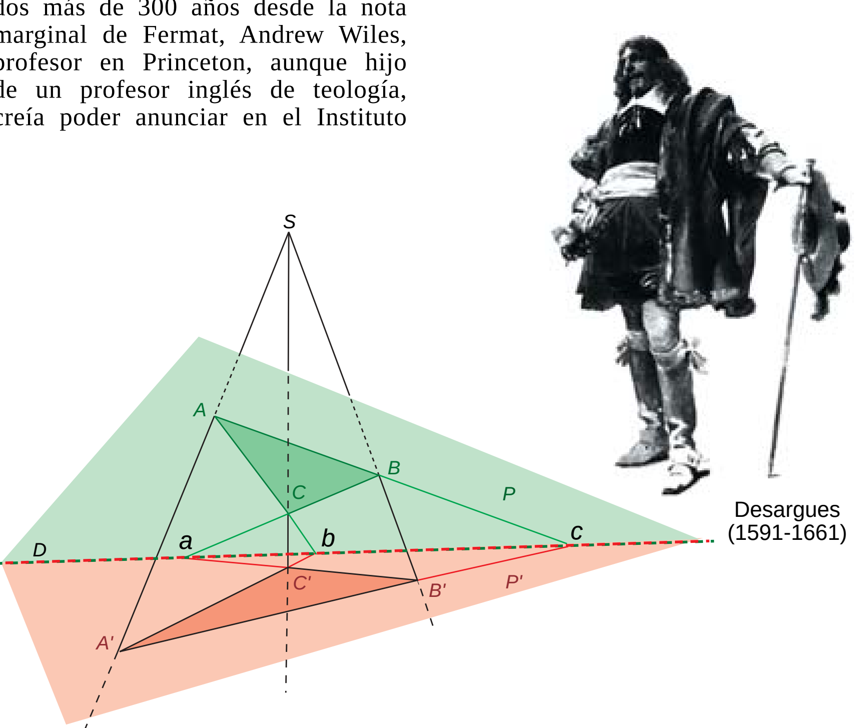
El 23 de junio de 1993, transcurridos más de 300 años desde la nota marginal de Fermat, Andrew Wiles, profesor en Princeton, aunque hijo de un profesor inglés de teología, creía poder anunciar en el Instituto Newton de Cambridge que una de las proposiciones que Fermat nos había legado —involuntariamente quizá, pues cabe preguntarse si la observación que había anotado en el margen de un ejemplar de la *Aritmética* de Diofanto estaba destinada a su publicación— había quedado provista a partir de ese momento de una demostración de elevada sutileza y de belleza deslumbrante. Al parecer, Fermat había encontrado su Arquímedes inglés.

Sin embargo, uno de los artificios de Wiles estaba todavía asentado en falso, y hubo que esperar al 19 de septiembre de 1994 para que, gracias a un trabajo intenso y al refuerzo de su colega Richard Taylor, de la Universidad de Cambridge, la magnífica catedral edificada por Wiles quedase libre al fin de todos los andamiajes y se alzase triunfante en el cielo matemático, símbolo de una labor de tres siglos (plazo no excepcional para una catedral). Esta última dubitación del destino ilustra adecuadamente los misterios y las sorpresas que ocultaba el "último teorema de Fermat".

Tiene una larga historia la búsqueda de ternas pitagóricas, tríos de números enteros x, y, z que sean soluciones de la ecuación $x^2 + y^2 = z^2$. Estas ternas pitagóricas se corresponden con ciertos puntos de la circunferencia de radio 1 y centro en el origen, cuya ecuación es $u^2 + v^2 = 1$; a saber, aquellos cuyas dos coordenadas sean números racionales: de la forma a/b, donde a y b son números enteros. Para convencernos, basta dividir entre z^2 los dos miembros de la ecuación $x^2 + y^2 = z^2$.

La resolución de la ecuación $x^2 + y^2 = z^2$, que es de las llamadas diofánticas, se conoce desde hace muchísimo tiempo. Cuando los exponentes son mayores que 2, la solución de las ecuaciones de la forma $x^n + y^n = z^n$ es radicalmente diferente. La aserción de Fermat es que, para valores del exponente n mayores que 2, las únicas soluciones enteras son las soluciones "triviales", en las que uno de los tres números enteros es nulo (por ejemplo, $x = 0$, e $y = z$), lo que se expresa diciendo que en tales casos el producto xyz es entonces igual a cero.

Volvamos a la interpretación geométrica. Las curvas representativas



1. LA GENERALIZACION a dimensiones superiores constituye un potente método de demostración. Hay propiedades de ciertas figuras planas que no son sino las sombras de propiedades de figuras espaciales. Si los puntos *SAA′*, *SBB′*, *SCC′* están alineados, también lo están *a*, *b*, *c*. Este teorema, debido a Desargues, se prueba fácilmente dándole relieve a la figura, que pasa a considerarse una proyección plana de dos triángulos en perspectiva en el espacio, a saber, los triángulos *ABC* y *A′B′C′*, situados en dos planos distintos, *P* y *P′*. Entonces, los puntos *a*, *b*, *c*, que se encuentran sobre la recta de intersección de los planos *P* y *P′*, están alineados.

de la ecuación $u^n + v^n = 1$ pertenecen a dos familias: una primera en la que el exponente es par (n es igual a $2p$) y una segunda familia en la que el exponente es impar (n es igual a $2p + 1$). El caso $n = 4$ fue resuelto por el propio Pierre de Fermat. El caso en que $n = 2p$ con p impar se deduce del caso en que n es impar. Efectivamente, poniendo $u' = u^2$ y $v' = v^2$ y sustituyendo estos valores en la ecuación, vemos que sólo se requiere estudiar el caso impar.

Podemos incluso limitarnos al caso en que n es número primo (distinto de 2, evidentemente), a pesar de que la condición de que el número p haya de ser primo parezca muy restrictiva. De hecho, esta limitación del alcance del teorema es engañosa, pues si la ecuación de Fermat no tiene solución cuando el número p es primo, como $(x)^{kp}$ es igual a $(x^k)^p$, no existe solución para ningún múltiplo de p.

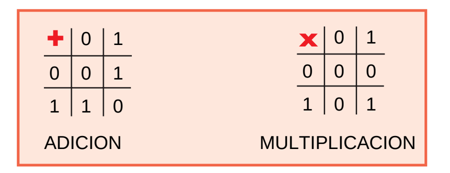
En el caso de que p sea número primo impar, la curva $u^p + v^p = 1$ posee tres puntos racionales triviales; a saber, el punto $(u, v) = (1,0)$, el punto $(u, v) = (0,1)$ y el punto del infinito de la curva, que se corresponde con la solución $(x, y, z) = (1, -1,0)$ de la ecuación diofántica $x^p + y^p = z^p$. La aserción de Fermat equivale a decir que si p es primo y distinto de 2, la curva $u^p + v^p = 1$ no posee ningún otro punto racional: es preciso demostrar que no hay sobre la curva más que *tres* puntos racionales.

Cuando se atascan en sus investigaciones, los matemáticos se valen de una estrategia especial: estudian variantes del problema, que presentan bajo diferentes formas. Niels Henrik Abel escribió que a los problemas de imposibilidad debía dárseles "forma tal que siempre sea posible resolverlos, lo que siempre podemos hacer... En lugar de solicitar una relación que no se sabe si existe o no, hay que preguntar(se) si tal relación es en verdad posible". Se deducen de ello los contornos de posibilidad del problema original.

Así fue como los algebristas del siglo XVI introdujeron los números "imaginarios" para estudiar las soluciones reales de las ecuaciones algebraicas. Newton, pragmático, escribió: "Conviene que en las ecuaciones haya raíces imposibles (entiéndase 'imaginarias'), sin lo cual, en los problemas (físicos), ciertos casos imposibles resultarían posibles."

Los matemáticos, en teoría de números, varían la estructura. En vez de examinar las soluciones enteras de las ecuaciones, estudian las soluciones módulo k. Reagrupan en una misma clase los números que producen el mismo resto al dividirlos por k. De esta forma, la clase de los números pares está constituida por los números iguales a cero módulo 2.

Los enteros módulo k poseen una estructura de anillo, es decir, están dotados de una adición y de una multiplicación que son reflejo de la adición y la multiplicación ordinarias.



+	0	1
0	0	1
1	1	0

ADICION

×	0	1
0	0	0
1	0	1

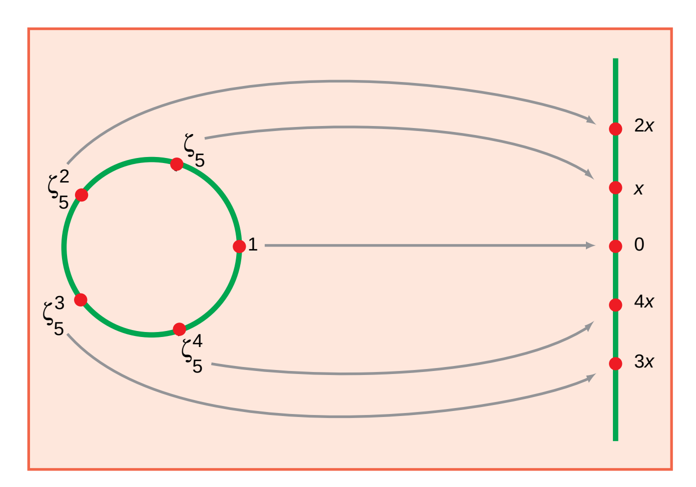
MULTIPLICACION

En el caso de que k sea igual a 2, los restos son 0 y 1, y se tiene:

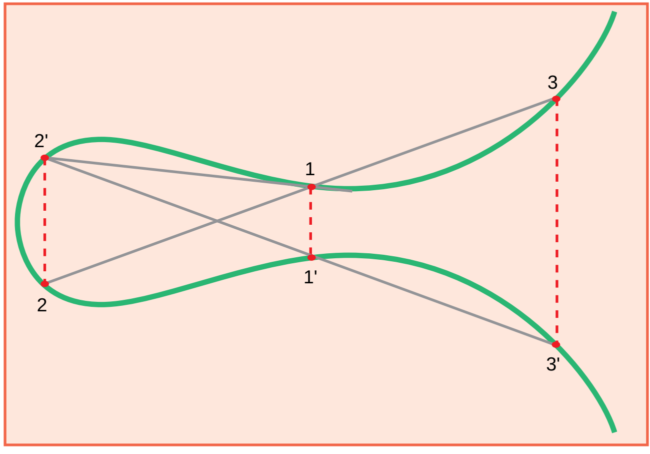
Valiéndose de la ley de reciprocidad cuadrática, debida a Euler, Legendre y Gauss, el matemático Gérard Terjanian logró en 1977 devolver todo su esplendor a los métodos tradicionales. Terjanian demostró que, si n es igual a $2p$, siendo p un número primo impar, entonces uno de los tres números x, y, z que verifican la ecuación de Fermat para el exponente $2p$, es igual a cero módulo $2p$, vale decir, es divisible por n. Era la primera vez que se obtenía un resultado tan general para lo que se ha dado en llamar "primer caso del teorema de Fermat".

En los métodos clásicos, aunque no así en el método de Andrew Wiles, la demostración de Fermat siempre comporta dos etapas. La primera, a la que damos el nombre de "primer caso", es la más fácil; consiste en demostrar, cuando el exponente es un número primo p, que p divide a uno de los tres números x, y, z que verifican la ecuación de Fermat.

Demos un ejemplo de tal demostración. Por ejemplo, si p es igual a 3, se examinan las soluciones módulo 9 de la ecuación $x^3 + y^3 = z^3$; se ve



2. LOS CINCO PUNTOS DEL CIRCULO representan los puntos de 5-división del grupo T. Las flechas envían estos cinco puntos sobre una recta, en la cual los puntos están descritos por los enteros módulo 5. Al producto de ζ^2 por ζ^4 en el círculo, que es el punto ζ, le corresponde la suma de $2x$ más $4x$, o sea $6x$ módulo 5, que es x. Para demostrar el teorema de Fermat de exponente p (5 en este caso) se utilizan los puntos de p-división de una curva elíptica asociada a una hipótetica solución de la ecuación de Fermat.



3. A PARTIR DE DOS PUNTOS 1 y-2 de coordenadas racionales sobre una curva elíptica se determina un punto 3, intersección de la recta que pasa por 1 y 2 con la curva. Las coordenadas del punto 3 también son racionales. El punto 3′, simétrico del punto 3, es el compuesto de los puntos 1 y 2; esta ley de composición define una estructura de grupo. La composición de un punto, el 3 por ejemplo, con el punto del infinito equivale a tomar el punto simétrico de 3′ con respecto al eje de simetría de la curva: el resultado vuelve a ser el mismo punto 3.

Las formas modulares

La función teta, definida para |q| < 1 por:

$$\theta(q) = \sum q^{n^2}$$

fue estudiada por Euler y Jacobi.
Poniendo $q(z) = e^{\pi i z}$, con $z = x + iy$, $y > 0$, obtenemos las ecuaciones funcionales:

$$(1) \qquad \theta(q(z)) = \theta(q(z + 2))$$

$$(2) \qquad \theta(q(-1/z)) = (z/i)^{1/2}\, \theta(q(z))$$

La serie de Dirichlet asociada a θ no es sino la cŽlebre "función dzeda" de Riemann:

$$\zeta(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^s} \quad \text{para Re}(s) > 1$$

Euler demostró que esta función posee "producto euleriano", esto es, un producto convergente cuyos ’ndices son los nœmeros primos:

$$\zeta(s) = \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^s} = \prod_{p} (1 - p^{-s})^{-1}$$

ÁLa ecuación funcional de la función teta conduce a la de ζ, y el producto euleriano de ζ nos lleva a nuevas propiedades de θ !
El 24 de abril de 1828, Jacobi descubrió la identidad:

$$\left(\sum q^{n^2}\right)^4 = 1 + 8 \sum A(m) z^m, \text{ donde } A(m) = \sum d, \; d \text{ divisor de } m \text{ y no congruente a 0 mód 4}$$

que le permitió dar instantáneamente el número de representaciones de un entero positivo en suma de cuatro cuadrados.
La ecuación (*2*) conlleva la ecuación funcional:

$$\frac{\Gamma(s/2)}{\pi^{s/2}}\, \zeta(s) = \frac{\Gamma((1-s)/2)}{\pi^{((1-s)/2)}}\, \zeta(1-s)$$

publicada por B. Riemann en 1859.
La famosa "hipótesis de Riemann" afirma que los ceros de $\zeta(s)$, que no sean –2, –4, –6, etc., se encuentran sobre el eje de simetría de esta ecuación (la recta definida por la condición "parte real de *s* igual 1/2"). La hipótesis de Riemann es una de las grandes conjeturas que nuestra época lega al siglo venidero.

entonces fácilmente que 3 divide a *x*, a *y* o a *z*. Presentando las cosas negativamente (reducción al absurdo), el primer caso de Fermat se demostraría diciendo que si *p* no divide a *xyz*, entonces la ecuación $x^p + y^p = z^p$ es imposible. Como el cero es divisible por todos los números, incluido el *p*, las soluciones triviales quedan ya eliminadas de partida. Volverá a encontrarse esta ventaja en el método de Wiles.

YVES HELLEGOUARCH es profesor de matemáticas en la Universidad de Caen.

En el segundo caso, mucho más difícil, se trata de demostrar que *p* divide no sólo a *xyz*, sino que *todas* las potencias de *p* dividen a *xyz*, lo que implica que *xyz* es igual a 0 (porque un número distinto de 0 no puede ser indefinidamente divisible).

Fermat había descubierto "una vía del todo singular" para resolver el segundo caso, amén de otros problemas de esta naturaleza: el "descenso infinito". El descenso infinito (la inducción matemática) constituye un ingrediente esencial de todas las demostraciones clásicas del "segundo caso" del teorema de Fermat, siendo inútil, en cambio, para el primer caso, como acabamos de ver. Aquí va a producirse una auténtica mutación: el método de Wiles tratará con un solo toque de varita mágica los casos primero y segundo, y esto, para todos los exponentes a la vez.

Finalmente, en 1985, momento en que la historia parecía dudar entre la tradición y las ideas del porvenir, tres osados mosqueteros, Adleman, Fouvry y Heath-Brown, trataron de zanjar definitivamente el primer caso. Su empeño fracasó, mas fracasó con gran donaire, pues demostraron el primer caso para una infinidad de exponentes primos. Este resultado levantó gran revuelo.

Ya en tiempos de Kummer habían aparecido los números algebraicos en el estudio del teorema de Fermat, números misteriosos que desempeñarán un papel esencial y que vamos a definir. Este apartado podríamos titularlo "el cuerpo de los números algebraicos y las representaciones de su alma". En efecto, la intuición subyacente a las cuestiones de este tipo fue ensoñada ya por Évariste Galois en la prisión de Sainte-Pélagie (en 1831) antes de recibir la consagración oficial en el programa de Erlangen de Félix Klein (en 1872). La idea consiste en asignar, a todo objeto matemático provisto de estructura, el grupo de transformaciones de ese objeto que respetan dicha estructura. Tal grupo se denomina grupo de automorfismos del objeto.

Si el objeto es el conjunto de los tres vértices de un triángulo isósceles (no equilátero) y su estructura es la distancia entre los vértices, sus automorfismos, las transformaciones que conservan al objeto y su estructura, son la identidad y la simetría obvia. Análogamente, cuando el objeto es un anillo, la estructura está formada por la adición y la multiplicación; los automorfismos del anillo son las transformaciones que hacen corresponder biunívocamente a cada elemento del anillo otro elemento del anillo, respetando esas dos leyes de composición.

Los números algebraicos son los números complejos que sean raíces de alguna ecuación polinómica de coeficientes fraccionarios (también llamados números racionales). La ecuación $3x^2 - 4$ tiene las raíces $2\sqrt{3/3}$ y $-2\sqrt{3/3}$: estos números son algebraicos. Salta a la vista que los números racionales son algebraicos. El número π no es raíz de ninguna ecuación polinómica de coeficientes fraccionarios no nulos, y por tanto no es algebraico. Se dice por ello que el número π es trascendente.

Los matemáticos han demostrado que los números algebraicos forman un cuerpo (la suma y el producto de dos números algebraicos son números algebraicos; el inverso o recíproco de un número algebraico no nulo también es algebraico).

Tomemos, por ejemplo, un número complejo z obtenido mediante sumas, restas, multiplicaciones y divisiones de números racionales entre sí y con el número complejo $\zeta_5 = e^{2i\pi/5}$. El número z es algebraico, porque el propio número ζ_5 es algebraico. En efecto, ζ_5 verifica la ecuación polinómica de coeficientes racionales $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = 0$. Esta ecuación no puede descomponerse en productos de polinomios de coeficientes racionales. El conjunto de los números obtenidos de igual manera que z forma el cuerpo ciclotómico de orden 5 (o sea, el cuerpo de la división del círculo en cinco partes iguales), que constituye un subcuerpo del cuerpo de todos los números algebraicos.

En nuestra teoría, este cuerpo posee un grupo de automorfismos, a saber, el grupo de las transformaciones de este cuerpo en sí mismo, que respetan la adición y la multiplicación. Tal grupo se denomina grupo de Galois de nuestro cuerpo ciclotómico.

Los automorfismos del cuerpo de los números racionales se reducen a la identidad; no son, pues, muy interesantes. Por suerte, ζ_5 pertenece a la familia de los cuatro hermanos gemelos $e^{2i\pi/5}$, $e^{4i\pi/5}$, $e^{6i\pi/5}$, $e^{8i\pi/5}$ que verifican la ecuación precedente. El grupo de Galois de nuestro cuerpo ciclotómico posee por lo tanto cuatro elementos.

El método utilizado por Kummer para estudiar la ecuación de Fermat de grado 5 constituye ya un ejemplo magnífico de la utilización de ciertos números ciclotómicos.

El grupo de los automorfismos del enorme cuerpo de todos los números algebraicos se denomina grupo de Galois absoluto. Por desdicha, apenas conocemos características de este grupo de Galois absoluto. Se trata de un objeto tan fundamental cuan misterioso, pero no por ello deja de ser el *leitmotiv* de la gran sinfonía orquestada por Wiles. Ya oigo al lector exclamar: si el grupo de Galois absoluto sigue siendo una noción metafísica, ¿cómo declarar acerca de él cosas positivas, falsables? Retomando el ejemplo anterior, vemos que todo automorfismo perteneciente al grupo de Galois absoluto se refleja en el grupo de Galois del cuerpo ciclotómico construido a partir del número ζ_5.

En realidad, lo hecho con el número 5 puede hacerse con todo entero positivo n. La imagen de los puntos ζ_n se encuentra sobre el círculo unidad del plano complejo; la multiplicación de números complejos dota a este círculo de una estructura de grupo conmutativo. Este grupo de números complejos de módulo 1 se designa T.

El punto ζ_5 es un elemento de T tal que $\zeta_5^5 = 1$; se dice que es un punto de 5-división de T. El conjunto de los elementos ζ que verifican esta condición forma un subgrupo cíclico de orden 5 de T. Lo que hicimos más arriba fue estudiar la acción del grupo de Galois absoluto sobre este subgrupo. Por ser este subgrupo isomorfo a una recta (*véase la figura 2*) sobre el cuerpo F_5 de cinco elementos, hemos efectuado una representación lineal del grupo de Galois absoluto sobre una recta.

Las representaciones del grupo de Galois absoluto han fascinando siempre a Jean-Pierre Serre. En los años setenta, Serre se interesaba por un tipo similar de representaciones, las del grupo de Galois absoluto actuando sobre el grupo de puntos de p-división de una curva elíptica cuya ecuación tenga coeficientes racionales. Examinaremos más adelante estas curvas elípticas.

Los puntos del círculo T están parametrizados por una variable real módulo 2π (un ángulo), pero los puntos de una curva elíptica están parametrizados por una variable compleja módulo dos períodos. De aquí resulta que los puntos de p-división no se encuentran sobre una recta, sino sobre un plano. Pero antes abordemos las curvas elípticas.

Tomemos una curva elíptica representada por la cúbica de ecuación $y^2 = x^3 + a_2 x^2 + a_4 x + a_6$. La curva está definida sobre los racionales si a_2, a_4 y a_6 son números racionales. Es necesario, además, que el segundo miembro de la ecuación no tenga una raíz doble; en tal caso, la cúbica posee un punto múltiple y deja de ser curva elíptica.

Dado que los puntos de la curva están parametrizados por una variable compleja módulo dos períodos, estos puntos forman un grupo conmutativo cuyo elemento neutro es el punto de parámetro 0. Lo habitual es elegir la parametrización de modo que el elemento neutro del grupo sea el punto del infinito de la curva. Los puntos

Formas modulares y curvas elípticas

La teoría de Eichler-Shimura le asocia a la forma modular f:

$$f = q \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^n)^2 (1 - q^{11n})^2$$

la curva elíptica $y^2 - y = x^3 - x^2$.
La anterior significa que al escribir:

$$f = q - 2q^2 - q^3 + 2q^4 + q^5 + 2q^6 - 2q^7 - 2q^9 - 2q^{10} + q^{11} - 2q^{12} + \dots = \sum a_n q^n,$$

el número de puntos módulo p de esta curva (contado el “punto del infinito”) es igual a $p + 1 - a_p$ (a condición de que p no divida a 11).

Si l es primo y distinto de 11, el operador de Hecke T_l está definido por:

$$T_l\left(\sum a_n q^n\right) = \sum a_{ln} q^n + l \sum a_n q^{ln}$$

Se comprueba que

$$T_l(f) = a_l f,$$

lo que significa que f es un vector propio del operador T_l.
La propiedad de f que le da el calificativo de “modular” es la ecuación funcional siguiente:

$$f[\exp(a\tau + b/c\tau + d)] = (c\tau + d)^2 f[\exp(\tau)],$$

donde $\exp(\tau) = e^{2i\pi\tau}$, siendo τ un nœmero complejo cuya parte imaginaria es positiva, $(a,b; c,d)$ es una matriz de cuatro enteros, tal que 11 divide a c y $ad - bc = 1$. (¡No es evidente!)

Las distintas rutas seguidas tras Fermat

RUTA DE LOS CAMINANTES

Fue la senda tomada por el propio Fermat para el exponente 4, y más tarde, por Lamé y Lebesgue para el exponente 7.

Consiste en ver la imposibilidad de resolver con enteros la ecuación $t^2 = r^4 + 4s^4$ en el caso de n igual a 4, y la ecuación $t^2 = r^4 - 3/4r^2s^2 + 1/7s^4$, cuando n es igual a 7 (*rst* distinto de cero); se procede después por descenso infinito.

FORMAS CUADRATICAS

Se podría pensar que en el caso de los exponentes p primos impares, Fermat asociaba a su ecuación la forma cuadrática $X^2 + (-1)^{(p+1)/2}pY^2$. En todo caso, así fue como procedieron Euler (para el caso $p = 3$) y, más tarde, Legendre y Dirichlet para p igual a 5.

EXTENSIONES CICLOTOMICAS

Desde tiempos de De Moivre, en el siglo XVIII, se sabe factorizar $x^p + y^p$ en producto de factores de primer grado en x e y, lo que condujo a considerar los números deducidos por sumas, restas y productos de $\zeta_p = e^{2i\pi/p}$, esto es, el anillo de los enteros ciclotómicos. De este modo, Kummer llegó a demostrar el aserto de Fermat para todos los números primos “regulares”. Por desdicha, no se sabe demostrar la existencia de una infinidad de tales números.

APROXIMACION ELIPTICA

Mucho más reciente que las anteriores (26 años). Constituye el tema de este artículo.

OBSERVACIONES

1) Los tres primeros métodos se valen del descenso infinito para demostrar el segundo caso (definido en el artículo).
2) En la ruta de los caminantes aparece una forma cuadrática en el caso de exponente 7.
3) El número cuadrático $((-1)^{(p-1)/2}p)^{1/2}$ figura implícitamente en el segundo método: pertenece al anillo de los enteros ciclotómicos.
4) Por último, el cuerpo de los números ciclotómicos está contenido en el cuerpo engendrado por las coordenadas de los puntos de p-división de la curva *E(A,B,C)*.

racionales de la curva elíptica son aquellos cuyas coordenadas son racionales. Un teorema de Abel explica la forma de construir la composición de dos puntos; con tal ley de composición, los puntos racionales forman un grupo (*véase la figura 3*).

En los años sesenta, uno de los temas de estudio para los aficionados a las curvas elípticas era cierta conjetura de Beppo Levi que afirma, entre otras cosas, que para todas las curvas elípticas definidas sobre los racionales, existe un mayorante del orden de los puntos racionales. El orden de un punto P es el mínimo entero no nulo n tal que P, compuesto n veces consigo mismo, es el elemento neutro.

Los puntos racionales de orden $2p^2$ revisten especial fascinación. B. A. Demjanenko y el autor los estudiaron entre 1965 y 1970. Para gran asombro nuestro, la existencia de estos puntos implicaba la existencia de una solución no trivial para la ecuación de Fermat de exponente p.

En 1969 tuve la idea de invertir el método: traté de demostrar que, si la ecuación de Fermat tenía una solución a, b, c formada por una terna de números no nulos, entonces la curva elíptica de ecuación $Y^2 = X(X - a^p)\ (X + b^p)$ tendría puntos interesantes de orden p. Si en esta ecuación no aparece el número c es porque se deduce de los otros dos por la ecuación de Fermat $a^p + b^p = c^p$. En lo sucesivo, la curva se designará $E(A, B, C)$, con $A = a^p$, $B = b^p$ y $C = -c^p$; algunos autores la denominan “curva de Frey”. Hemos de señalar que no es posible dar un ejemplo de curva $E(A, B, C)$ asociada a una solución no trivial de la ecuación de Fermat, porque no existe. Sí podemos, empero, ofrecerlos para ecuaciones cercanas, como $x^p + y^p = 2z^p$.

Hemos pasado así del problema de Fermat de grado p a un problema concerniente a los puntos de orden p de la curva elíptica $E(A, B, C)$. Los matemáticos, también en este caso, han ampliado el problema: al punto (a, b, c) le han hecho corresponder una curva elíptica $E(A, B, C)$, pasando, con ello, de un objeto algebraico, un punto $(u, v) = (a/c, b/c)$ de la curva $u^p + v^p = 1$, a un objeto “trascendente”, la curva $E(A, B, C)$.

El traslado a dimensión superior para demostrar un teorema había sido utilizado con provecho por Desargues (*véase la figura 1*). Esta demostración, célebre por su sencillez, pone de relieve el interés de cambiar de “punto de vista”. Empero, una teoría más general que la teoría precedente carece de interés si no proporciona resultados imprevistos; de lo contrario, se convierte en artificio inane.

Las curvas elípticas eliminan las soluciones triviales de la ecuación de Fermat. En efecto, la curva $E(A, B, C)$ admite un punto doble si y solamente si el polinomio $X(X - A)(X - B)$ admite una raíz doble, esto es, si y solamente si $ABC = (abc)^p = 0$.

El resto del programa consistía en ver qué se podía saber acerca de los puntos de orden p de la curva $E(A, B, C)$. El autor advirtió, en 1969, que sus coordenadas generaban un cuerpo algebraico muy parecido al cuerpo ciclotómico engendrado por ζ_p. Las curvas $E(A, B, C)$ así asociadas a las hipotéticas soluciones no triviales de la ecuación de Fermat proporcionarían, merced a sus puntos de p-división, representaciones del grupo de Galois absoluto que son demasiado hermosas para existir.

Se sospechaba, desde que nacieron, que las curvas $E(A, B, C)$ eran yeguas de Orlando (en *Orlando furioso*, la yegua de Orlando posee todas las cualidades, excepto la existencia). Pero, ¿cómo demostrarlo? Entonces, en 1985, intervino Gerhard Frey. En un manuscrito inédito, titulado “Modular Elliptic Curves and Fermat’s Conjecture”, Frey conjeturaba que las curvas $E(A, B, C)$ no podían satisfacer la conjetura de Taniyama-Weil. ¡Decididamente, a la historia le gustan los márgenes!

Se le atribuye a M. Eichler haber dicho que en aritmética hay sólo cinco operaciones fundamentales: suma, resta, multiplicación, división... y las formas modulares. Las formas modulares son funciones de variable compleja que verifican ecuaciones funcionales. Encontramos vestigios fragmentarios de ellas en el *Ars conjectandi* de Jacques Bernoulli (1713),

algunos hermosos especímenes, después, entre ellos, la función θ, en Euler (1748), en la *Introductio in Analysim Infinitorum*, donde aparecen asimismo series de Dirichlet y donde hallamos también la expresión en forma de producto euleriano de la función ζ de Riemann. Quedamos atónitos ante la caja de Pandora abierta por Euler. Su *Algèbre* rebosa así de ecuaciones diofánticas, de curvas y de integrales elípticas.

Es posible que fuera en Euler donde el matemático alemán E. Hecke haya hecho la compra. Hecke ha relacionado la ecuación funcional y el desarrollo en producto de la función ζ de Riemann con extrañas propiedades de la función θ. Sus estudios tendrán un papel crucial en la demostración del teorema de Fermat-Wiles.

Las formas modulares se comportan como organismos, estando sus propiedades enlazadas de forma estricta y armoniosa por la acción de un grupo. Las que aquí nos interesan son vectores propios de operadores muy importantes, para nosotros, a saber, los operadores de Hecke.

Se conocía, desde los años cincuenta, la forma de asociar una serie de Dirichlet a cada curva elíptica, serie a la que se llamaba función L de la curva, y en la que se guardaban numerosas informaciones concernientes a los puntos racionales de esta curva. Por otra parte, Hecke había mostrado ya cómo asociar formas modulares a ciertas series de Dirichlet, de forma tal que si éstas poseen un producto euleriano (un producto extendido a los números primos), aquéllas son vectores propios de operadores de Hecke. Sin embargo, las informaciones sobre las funciones L eran demasiado fragmentarias para demostrar la existencia de la forma modular en el caso general.

En 1955, la voz de Taniyama clamó en el desierto y anunció que toda curva elíptica debía provenir de una forma modular. Esta profecía, prematura y vaga, apenas suscitó interés en aquel tiempo...

Vale la pena detenerse aquí para evocar cuestiones de estilo. Suele decirse que la contribución de los matemáticos franceses está marcada de positivismo. El filósofo Auguste Comte, papa del positivismo en el siglo XIX, veía en el desarrollo histórico de la ciencia tres estadios sucesivos: el estadio teológico, el estadio metafísico y el estadio positivo. La teoría solamente es verificable en este tercer estadio, o como se diría hoy, falsable según Popper. La teoría debe ser lo suficientemente precisa para ser puesta en tela de juicio si es imperfecta.

En este sentido, André Weil efectuó una aportación esencial a la conjetura de Taniyama. Apoyándose en la teoría de Eichler-Shimura, logró precisar de qué manera debíamos buscar la forma modular asociada a una curva elíptica. La escena estaba preparada para el espectáculo, pero el tiempo parecía haber suspendido su vuelo. No se sabía qué hacer con las curvas elípticas $E(A, B, C)$ que pudieran quedar asociadas a una hipotética solución no trivial de la ecuación de Fermat.

Se dice que el toque de varita mágica fue dado en 1985 por Gerhard Frey, profesor, a la sazón, de la Universidad de Sarrebruck. Frey conjeturaba que nuestras curvas $E(A, B, C)$ deberían contradecir la conjetura de Taniyama, y ¡maravilla de las maravillas!, la comunidad matemática lo creyó. Serre, tan prudente de ordinario, "disparó el tiro que dio la vuelta al mundo" al publicar profundas conjeturas de las cuales se deducía el teorema de Fermat. Poco después, en 1987, B. Mazur y K. Ribet demostraron estas conjeturas para la representación hipotética de un grupo de Galois absoluto, que estaría asociado a una solución no trivial de la ecuación de Fermat, aunque con una condición: era necesario que la curva $E(A, B, C)$ verificase la conjetura de Taniyama.

Estimulado por el teorema de Ribet, Andrew Wiles se embarcó en solitario para un largo viaje por "océanos extraños de pensamiento". La navegación fue dura. Sin embargo, en 1991 algunas aves del cielo señalaron la proximidad de tierra. En 1992 Wiles creía haber llegado casi a su objetivo y el 21 de junio de 1993, en el Instituto Newton, anunciaba que el teorema de Fermat estaba demostrado.

Lástima, porque el anuncio resultó prematuro y las aves desaparecieron del horizonte. Otro seguramente habría abandonado, pero Wiles no prestó oídos más que a su coraje y a su colega R. Taylor; éste le incitó a volver sobre sus pasos. Así fue como el 19 de septiembre de 1994, Wiles vio con claridad la solución tan buscada: un procedimiento descubierto por Ehud de Shalit abría un camino más directo hacia la conjetura de Taniyama para las curvas $E(A, B, C)$.

Nació una obra maestra y se desvaneció el mito: el teorema de Fermat ha quedado, al fin, demostrado. Además, el trabajo de Wiles abre la vía hacia un vasto continente de futuras investigaciones, en el que numerosas conjeturas siguen pendientes de demostración.

La lista de las ecuaciones diofánticas abordables por el método de las curvas $E(A, B, C)$ dista de estar cerrada. Sin embargo, no es posible estudiar directamente por este método las soluciones de una ecuación tan próxima a la del teorema clásico, como la $x^n + y^n = 2z^n$, porque esta ecuación posee la solución no trivial (1,1,1). Seguramente, Fermat no está tan muerto como se piensa y su nota marginal suscitará, cabe pensarlo, nuevos hallazgos.

En este estadio del panorama el lector tiene una idea acerca del "cómo" del teorema de Fermat. El "porqué" de estas investigaciones puede resultarle enigmático: nos parece que esta cuestión no puede examinarse en términos lógicos y que la razón de ser de las matemáticas sigue siendo y será una elección artística. El matemático Emil Artin expresa con vigor este punto de vista: "Todos pensamos que las matemáticas son un arte... Las matemáticas, qué duda cabe, son lógicas: cada conclusión se deduce de resultados que la preceden. Sin embargo, la totalidad de la cuestión, la verdadera obra de arte, no es lineal; y lo que es mucho peor, su percepción no puede ser sino instantánea. Todos hemos experimentado, en raras ocasiones, un sentimiento de exaltación al darnos cuenta de que hemos hecho ver a nuestros oyentes, en el intervalo de un segundo, la arquitectura completa de una cuestión con todas sus ramificaciones."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POINTS D'ORDRE 2^{p^h} SUR LES COURBES ELLIPTIQUES. Yves Hellegouarch, en *Acta Arithmetica XXVI*, 1975.

UN THÉORÈME DE FERMAT ET SES LECTEURS, Catherine Goldstein. Presses Universitaires de Vincennes, 1995.

GRAND THÉORÈME DE FERMAT, en *Quadrature*, n.º 22, verano 1995.

Séminaire Bourbaki. Ponencias de Jean-Pierre Serre y Joseph Oesterlé. Junio de 1995.

GALOIS REPRESENTATIONS AND MODULAR FORMS, por K. A. Ribet, en *Bulletin of the American Mathematical Society*, octubre de 1995.

Atrapados en ámbar

Los tejidos de insectos delicadamente conservados en ámbar revelan secretos genéticos de la evolución

David A. Grimaldi





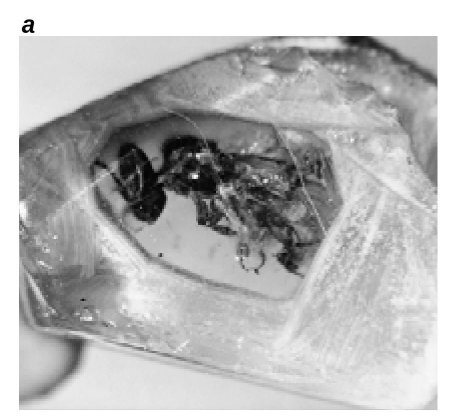
1. SANTATERESA o mantis religiosa conservada en ámbar dominicano, que en su mayor parte tiene 25 millones de años de antigüedad. Estos insectos están emparentados con las cucarachas y los termes; el de la ilustración cayó probablemente en la resina mientras estaba al acecho de una presa sobre el tronco de un árbol que exudaba esa substancia de la que se forma el ámbar.

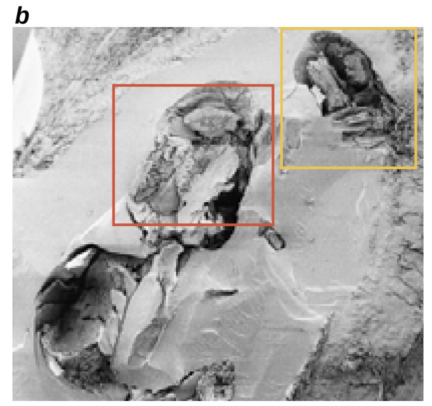
El huracán había lacerado el bosque de árboles gigantes del género *Hymenaea* que medraba cabe la costa centroamericana. Chorros amarillos de resina rezumaban de las ramas destrozadas y de los troncos acuchillados; los insectos se multiplicaban entre los restos. Un terme se acercó demasiado a la resina y quedó atrapado; el flujo acabó envolviéndolo. Terpenos y otros vapores aromáticos de la resina penetraron en los tejidos del terme, sustituyendo el agua y matando las bacterias.

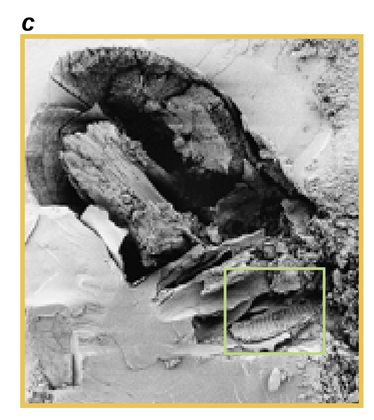
El aire, la luz y el calor solar indujeron reacciones químicas en la resina; así, los átomos de carbono de sus largas moléculas empezaron a enlazarse. La pella de savia endurecida cayó al suelo, una entre miles. Las mareas de tormentas tropicales de cualquier año después arrastraron los fragmentos de resina y los troncos en putrefacción hasta una laguna, donde los sedimentos costeros los cubrieron. Veinticinco millones de años de presión subterránea polimerizaron todavía más la resina, haciéndola sólida y químicamente inerte. Los movimientos tectónicos acabaron por levantar la costa en empinadas



TAMAÑO REAL







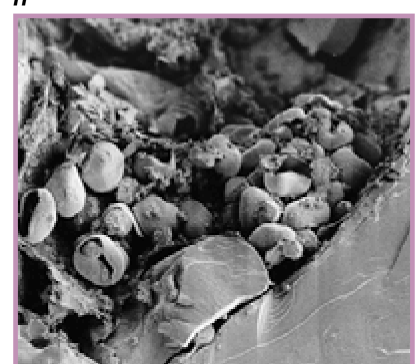
montañas de 1000 metros de altura, que se convertirían en la isla caribe de La Española.

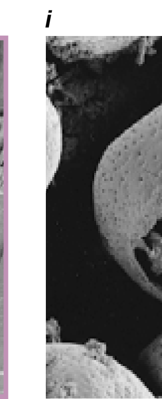
Vagaba por esas colinas, hace algunos años, un minero dominicano cuando dio con un pequeño desprendimiento de tierra que revelaba una veta negra de madera fósil. Excavando en el filón, desenterró un montón de pepitas. Un hábil golpe de su machete descantilló una ventana en una piedra, y se le reveló el vítreo destello del ámbar. En el interior del fragmento había un terme muy grande, con las alas ligeramente separadas y las patas extendidas.

El fragmento de ámbar con su *Mastotermes electrodominicus* embalsamado acabó en el Museo Americano de Historia Natural. Desde hace tiempo los entomólogos están intrigados por esos insectos primitivos, que comparten algunas características anatómicas con las cucarachas y que se pensaba que vinculaban a éstas con los termes modernos. En rocas y ámbar de todo el mundo aparecen parientes de *Mastotermes* que se fueron extinguiendo a lo largo de un intervalo que se remonta entre 130 y 30 millones de años atrás. Se conoce una especie superviviente en Australia, *M. darwiniensis*, que constituye una auténtica reliquia evolutiva.

En 1992 trabajaba yo con Rob DeSalle, Ward Wheeler y John Gatesy, adscritos al laboratorio de sistemática molecular del museo neoyorquino. Se cortó el espécimen de La Española, lo que nos permitió extraer tejidos del terme (uno de los varios que componen nuestra colección). La muestra contenía células en perfecto estado de conservación, algunas incluso con las mitocondrias intactas. Los tejidos, deshidratados, no se habían encogido, como sí sería de esperar al desaparecer el agua. El proceso por el cual la resina "fija" el tejido, de manera que éste conserve



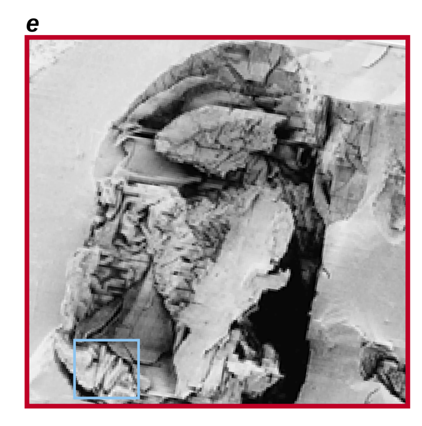




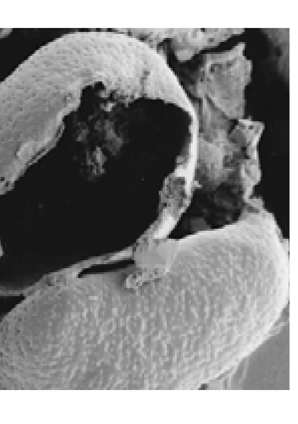


TAMAÑO REAL









2. MICROGRAFIAS ELECTRONICAS DE BARRIDO de una abeja inerme, *Proplebeia dominicana*, que atestiguan la asombrosa conservación de los tejidos en ámbar. El fragmento pulido (*a*) se sierra a una distancia mínima del insecto, se limpia y se abre forzándolo cuidadosamente con una palanca. La mitad izquierda del espécimen (*b*) contiene partes de la cabeza (*arriba*), tórax (*centro*) y abdomen (*abajo*). En el interior de la cabeza (*c*) se halla el cerebro (*arriba, centro*) y los largos músculos utilizados para chupar (*izquierda*), junto con la pequeña lengua de la abeja (*abajo*). Las escamas de la lengua (*d*) miden unas 10 micras de longitud cada una. El tórax (*e*) contiene sacos aéreos plegados y, entre otras estructuras, un pequeño haz de músculos (*f*), cuyas fibras alcanzan unas 15 micras de espesor. La mitad derecha del espécimen (*g*) presenta la otra mitad del abdomen (*abajo, derecha*), así como granos de polen (*h*) que la abeja había ingerido. Uno de estos granos (*i*), que aquí se ve desde un ángulo distinto, tiene unas 30 micras de diámetro. Las abejas inermes abundan en el ámbar dominicano: con frecuencia quedaban atrapadas en la resina cuando la recolectaban para construir sus nidos.



3. UN ZOOLOGICO en ámbar: en un fragmento de sólo 2,8 centímetros de diámetro (*página anterior*) hay 62 insectos, completos o en parte. Un mapa de los ejemplares (*izquierda*), dibujado por el autor, ilustra insectos pertenecientes a cinco órdenes y 14 familias. Entre ellos hay varios mosquitos de las agallas (cecidómidos), hormigas, escarabajos, larvarios y adultos, y avispas parasitoides, entre ellas una que acaba de depositar sus huevos (*izquierda, arriba*). Alas y antenas de termes flotan por la escena; partes de tres termes surgen de mohos borrosos. (Quizás al principio algunos insectos quedaron sólo parcialmente atrapados. Las partes expuestas se descompusieron, se enmohecieron y quedaron luego recubiertas por otra capa de resina.)

su tamaño original, sigue envuelto en el misterio.

La deshidratación era fundamental para el éxito de nuestro experimento. Después de la muerte, el ADN se degrada en presencia de agua; la desecación había permitido que segmentos grandes de ADN sobrevivieran inalterados. Aislamos segmentos de los genes 18s y 16s del ADN ribosómico. Cartografiando la secuencia de bases en un fragmento de ADN, la comparamos con las secciones correspondientes de termes, cucarachas y santateresas actuales, que constituyen el grupo Dictiópteros.

Resultó que la similaridad física entre *Mastotermes* y las cucarachas era un vestigio de un origen todavía más antiguo. Los *Mastotermes* extinguidos presentaban un estrechísimo parentesco con los actuales; ambos, termes en sentido estricto. Las dos especies diferían en nueve pares de bases en un segmento del gen 16s, que tiene 100 pares de bases. El ADN extinguido nos permitió reconstruir el árbol evolutivo del grupo y ayudó a esclarecer la relación de *M. darwiniensis* con otros termes.

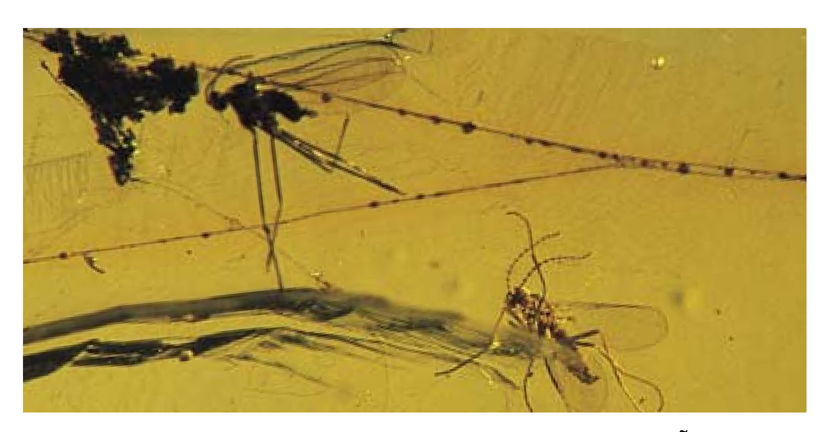
Desde aquel estudio, se ha secuenciado ADN de una mosca del vinagre, *Drosophila*, de una abeja inerme (sin aguijón), de un mosquito de la madera (rífidos), un mosquito de las setas (micetofílidos) y escarabajos de las hojas (coleópteros crisomélidos), todos ellos conservados en ámbar dominicano. En 1993, el equipo de Raúl Cano secuenció ADN de un gorgojo procedente de ámbar libanés; con 125 millones de años de antigüedad, es el ADN más antiguo que se conoce.

En estos momentos, recaba nuestra atención ámbar procedente del período Cretácico, de hace 140 a 65 millones de años. Los dinosaurios se extinguieron al final de este período (con la excepción de las Aves, sus descendientes); y lo que es más importante, el paisaje se transformó durante el Cretácico. Las fanerógamas llenaron de flores la escena. Al mismo tiempo, surgieron por evolución muchos grupos modernos de insectos: hormigas, termes, abejas, polillas, mariposas, escarabajos y otros animales íntimamente asociados con las plantas con flores.

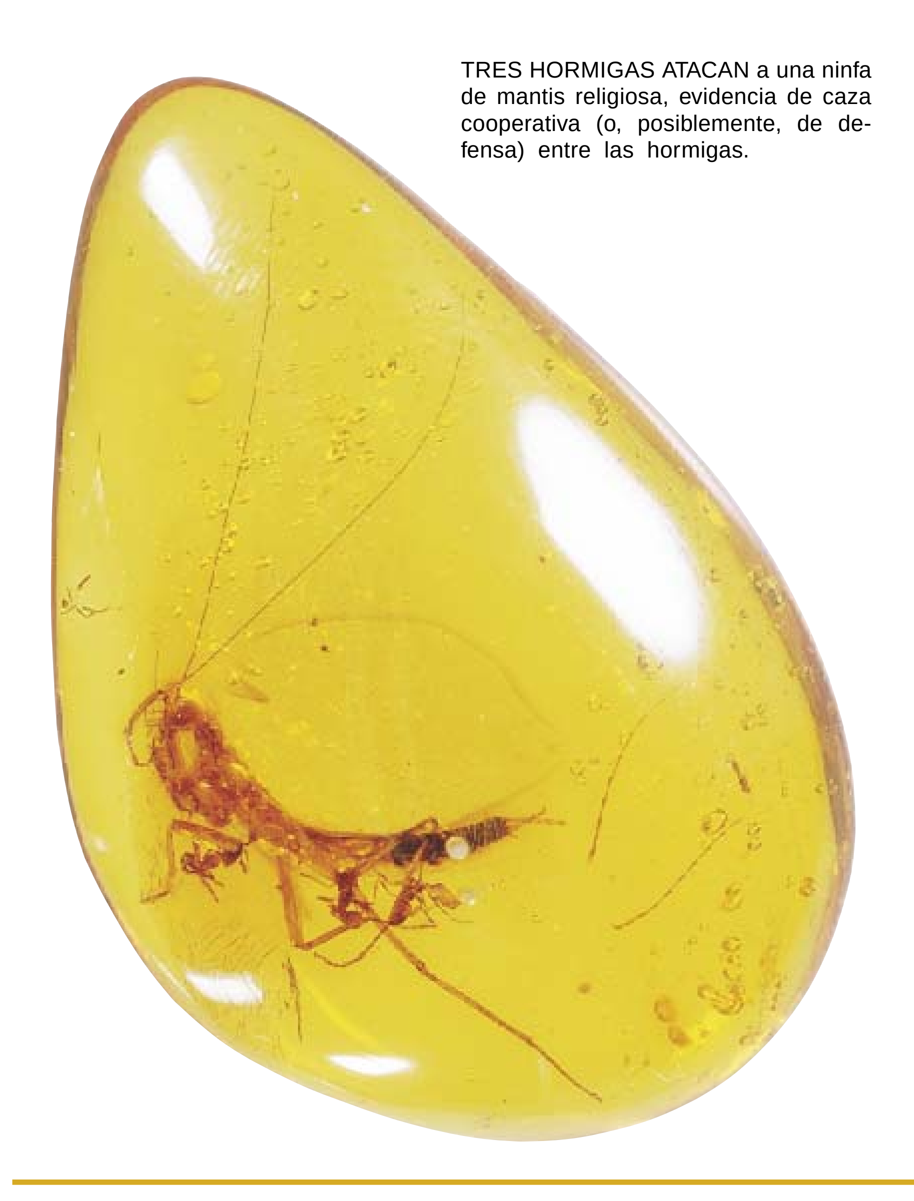
Uno de los yacimientos más importantes de ámbar del Cretácico, de hace 90 a 94 millones de años de antigüedad, fue descubierto en el centro de Nueva Jersey hace unos cinco años. Ha proporcionado algunos fósiles extraordinarios; por

Con las manos en la masa

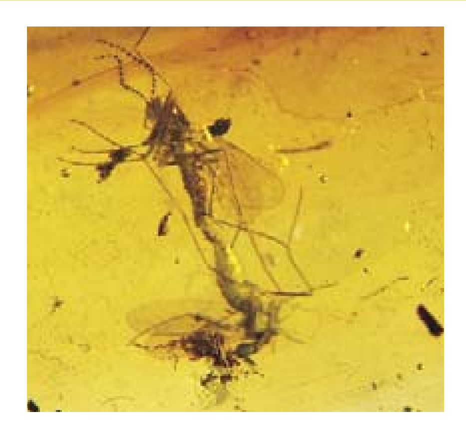
Las escenas de insectos registradas en ámbar de Santo Domingo han demostrado que algunos comportamientos que nos son hoy familiares tienen, por lo menos, 25 millones de años de historia.



LAS HEBRAS DE UNA TELARAÑA enredan a uno de los dos delicados mosquitos de las agallas, de la familia Cecidómidos.



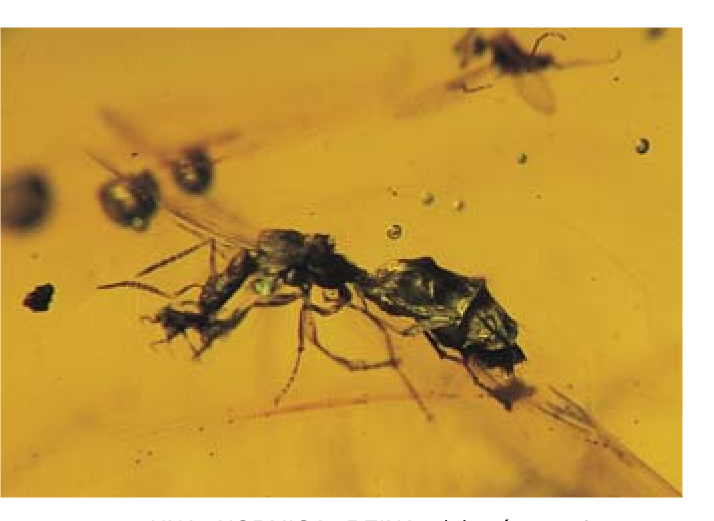
TRES HORMIGAS ATACAN a una ninfa de mantis religiosa, evidencia de caza cooperativa (o, posiblemente, de defensa) entre las hormigas.



EL AMOR Y LA MUERTE unen a dos mosquitos de las agallas en cópula, lo que proporciona ejemplares de ambos sexos. La hembra habría puesto unos 100 huevos, de los que surgen larvas fungívoras.



AL PONER HUEVOS mientras muere, una polilla demuestra un acto reflejo que se observa en muchos insectos. Se cree que las larvas de esta polilla (de familia desconocida, probablemente Tineoidos) se alimentaban de yesqueros, hongos duros y leñosos que infectaban los árboles del género *Hymenaea*.



UNA HORMIGA REINA del género *Acropyga* transporta en sus mandíbulas a un pulgón, en un ejemplo excepcional de simbiosis. Algunas hormigas cuidan de colonias de tales insectos, de los que recolectan una secreción azucarada llamada ligamaza. (Algunos parientes actuales de los pulgones son plagas comunes de jardín, como las moscas blancas.) Cuando la reina abandona su antigua colonia, lleva consigo en el vuelo nupcial un pulgón, que fundará su nuevo nido.



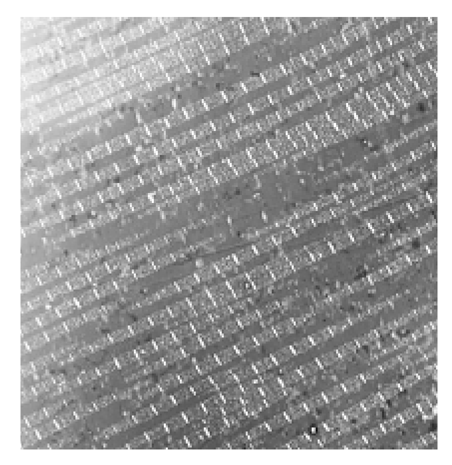
UN ACARO SE CUELGA del abdomen de un mosquito quironómido. Estos mosquitos viven durante sus estadios larvarios en el agua o en suelos muy húmedos, y allí recogen a los ácaros.

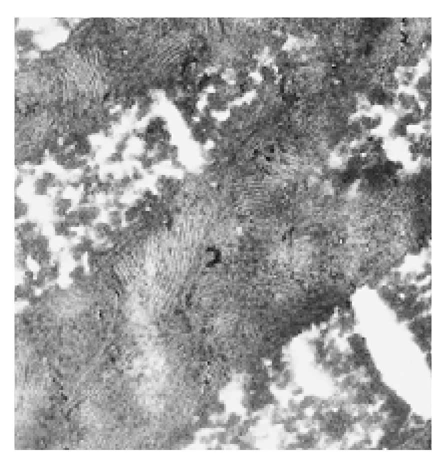


UN CINIFE PICADOR (familia Ceratopogónidos), hinchado después de un banquete de sangre. La creencia popular afirma que la sangre en mosquitos similares de ámbar del Cretácico procedía de dinosaurios. Este mosquito, sin embargo, vivió 40 millones de años después de que los dinosaurios hubieran desaparecido.

ejemplo, el de una pluma de ave (el registro terrestre más antiguo de un ave en Norteamérica) y la abeja y la hormiga más antiguas, así como otros varios insectos. Hemos descubierto la única flor en ámbar cretácico, una pequeña inflorescencia del roble más antiguo que se conoce.

El ámbar de Nueva Jersey bien pudiera contener algunos de los insectos más diversos y más perfectamente conservados del Cretácico. Esperamos ansiosamente cualquier otra cosa que nuestros descubrimientos revelen.





4. MUSCULOS DEL VUELO de una abeja inerme fósil (*izquierda*), aumentados para que revelen las fibras musculares en bandas. Cada fibra tiene hasta una micra de sección. Entre las hebras se empaquetan las membranas replegadas de las mitocondrias que, cortadas en sección, parecen huellas dactilares (*derecha*). El autor y sus colegas extrajeron ADN de células similares de un terme.

actuales
extinguidos
Cucarachas
Santateresas
Mastotermes
otros termes
Termes

5. ARBOL EVOLUTIVO para el grupo Dictiópteros (que comprende los termes, las cucarachas y las mantis religiosas o santateresas); se construyó en parte con la ayuda de ADN conservado en ámbar dominicano. Gracias al ADN procedente de una especie extinguida (*Mastotermes electrodominicus*, uno de cuyos ejemplares aparece en la parte inferior), se demostró que, pese a su parecido morfológico con las cucarachas, el insecto era realmente un terme.









6. AMBAR DE NUEVA JERSEY, que tiene entre 94 y 90 millones de años de antigüedad. Aporta los fósiles más sugestivos. El grupo de flores parecidas a las del roble (*izquierda*) constituye la inflorescencia más antigua conservada en ámbar, procedente de una época en la que surgieron por vez primera por evolución las plantas fanerógamas. La pluma (*arriba*) es el registro más antiguo de un ave terrestre en Norteamérica. El ámbar contiene asimismo los especímenes más antiguos de varios insectos, como un tipúlido (*abajo*). Conservada en arcillas junto al ámbar se encuentra una flora diversa, como esta flor de *Detrusandra* (*derecha*), de dos milímetros de ancho, pariente de las magnolias. El ejemplar de la micrografía electrónica de barrido fue convertido en puro carbón, seguramente por incendios forestales.





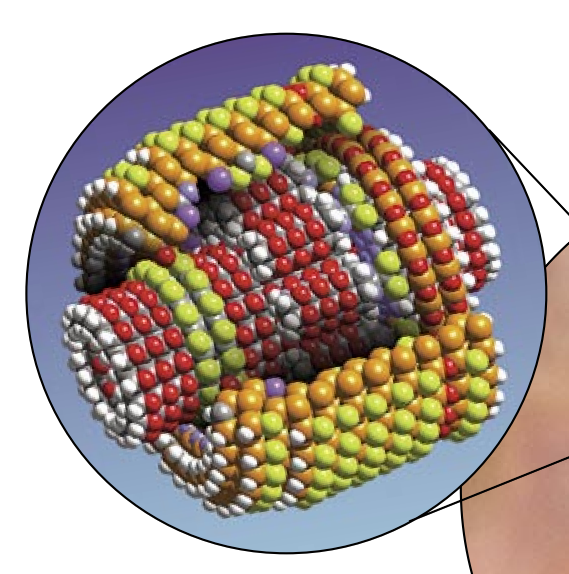
7. UNA RANA Y UN GECO (de los géneros *Eleutherodactylus* y *Sphaerodactylus*, respectivamente) atrapados en fragmentos de ámbar dominicano que tienen 5,8 y 4,3 centímetros. Sobre la rana se advierte el cadáver descompuesto de otra, rodeado por larvas de mosca. La columna vertebral del geco está rota, quizá porque pugnó por despegarse de la resina; la hoja que está junto a él aparece mordida, seguramente por una abeja cortadora de hojas. El ámbar dominicano es famoso por la variedad de organismos que encierra, entre ellos estos raros vertebrados.

DAVID A. GRIMALDI dirige el departamento de entomología del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Se doctoró en 1986 por la Universidad de Cornell, donde se desempeña hoy como profesor de entomología. Enseña también en otros centros superiores de la capital neoyorquina. El principal interés de Grimaldi es la sistemática (en especial de las moscas de la familia Drosofílidos), la paleontología y la biogeografía, la ciencia que explica por qué los organismos están donde están. Como los buenos naturalistas de antaño es, además, un experto dibujante.

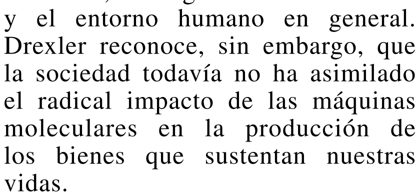
¿Ante una nueva revolución?

Gary Stix





Ante un atónito auditorio de científicosy profesionales diversos, Eric Drexler, el profeta de la nanotecnia, bosqueja un panorama increíble. De aquí a treinta años máquinas robóticas con piezas del tamaño de una molécula de proteína desencadenarán una auténtica revolución en la técnica, la medicina, la agricultura y el entorno humano en general. Drexler reconoce, sin embargo, que la sociedad todavía no ha asimilado el radical impacto de las máquinas moleculares en la producción de los bienes que sustentan nuestras vidas.



El concepto de nanotecnia abarca la fabricación de materiales y estructuras con dimensiones de hasta 100 nanómetros (1 nanómetro = 10^{-9} metros). Interesa a una multitud de disciplinas, desde la síntesis química hasta las técnicas de manipulación átomo a átomo con minúsculos elementos sonda. Según Drexler, los métodos actuales de microfabricación evolucionarán hacia técnicas de fabricación de robots moleculares o versiones en miniatura de molinos del siglo pasado. En cuestión de horas, los sistemas fundados en la nanotecnia de Drexler producirían cualquier cosa, desde un buque portamisiles hasta un diminuto submarino capaz de combatir una enfermedad dentro del propio torrente sanguíneo. Y, a semejanza de las células biológicas, los robots de las nanofactorías podrían incluso fabricar reproducciones de sí mismos. En la nueva era, el coste de los productos terminados excederá muy poco del valor del diseño y las materias primas: aire, azúcar de remolacha o económicos forrajes de hidrocarburos. Drexler contempla un futuro configurado por esenciales transformaciones sociales. La nanotecnia podría mitigar el hambre planetaria, purificar el medio ambiente, curar el cáncer, asegurar una esperanza de vida como la de los patriarcas bíblicos, pero también desarrollar nuevas armas de horror inconcebible.

Los científicos visionarios han desplazado su foco de atención del espacio exterior al interior, conforme se han ido desvaneciendo los sueños de colonizar otros planetas o viajar a otras galaxias. Ahora son los magos de la informática y los biólogos moleculares, y no los ingenieros espaciales, los nuevos héroes que intentan trascender los límites impuestos por la economía y la mortalidad. “Sean acertadas o no las utopías de Drexler”, dice Seth Lloyd, profesor y experto en computación cuántica del Instituto de Tecnología de Massachusetts, “la verdad es que llegan en un momento en que muchos campos se han estancado. Pocos proyectos han igualado la audacia del programa espacial”.

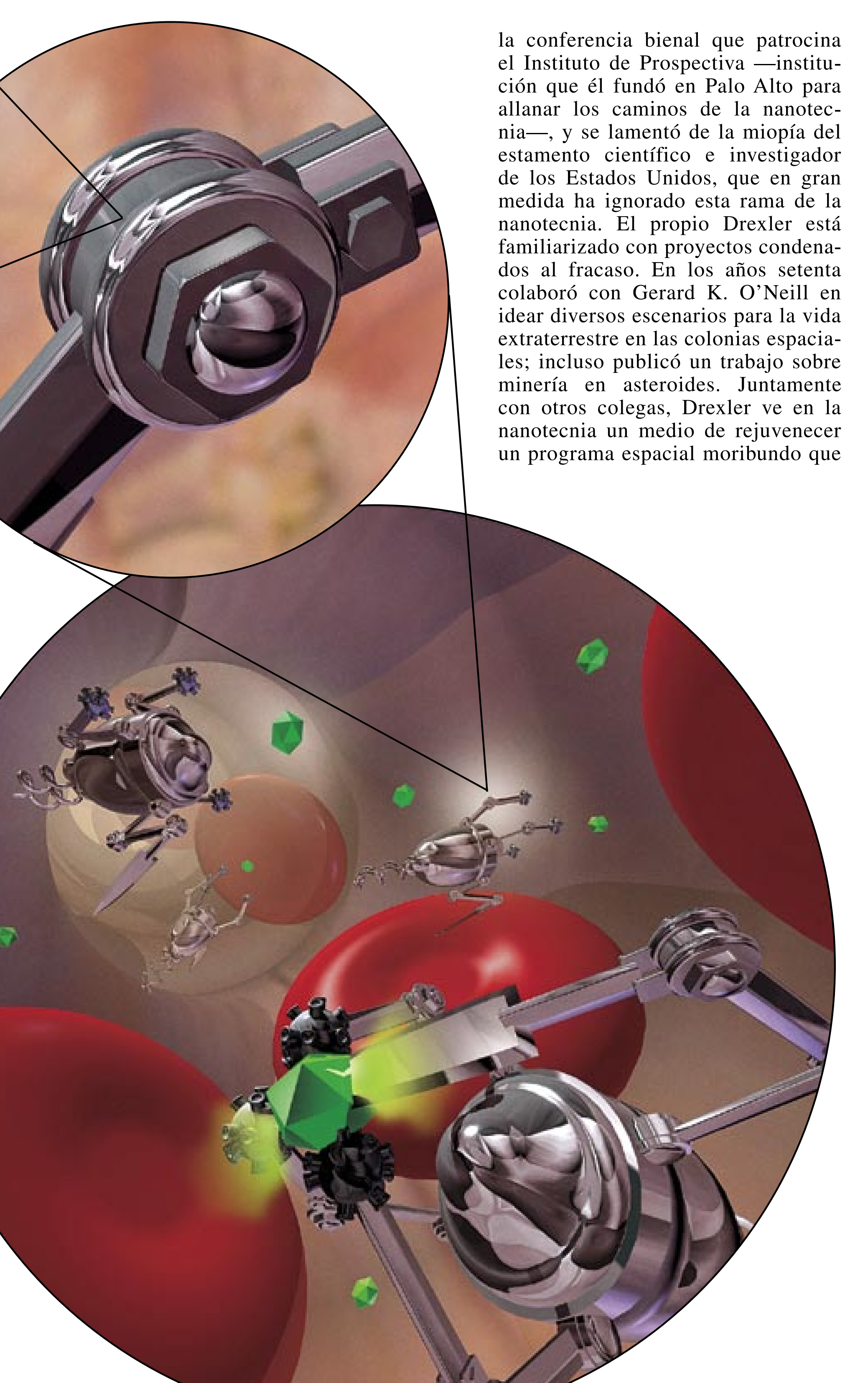
La idea de unas máquinas submicroscópicas que puedan salvar o destruir el mundo conmueve tanto a un almirante retirado como a un dentista apasionado por la técnica o a inquietos estudiantes, que de todo hubo en la conferencia de Drexler. Hace casi veinte años que éste acaricia tales “nanovisiones”. Pero en los últimos años sus artificiosas imágenes de los siglos venideros se ven ya sobrepasadas por las investigaciones reales en el campo de la nanotecnia. El objetivo de los que hoy trabajan en nanómetros es mucho más prosaico que los robots moleculares, pero su finalidad es mucho más pragmática. La nanotecnia tal vez no sea la promesa de abundancias sin cuento y dominio ilimitado del mundo material, sino la producción de ordenadores más potentes, el diseño de nuevos fármacos o simplemente una mayor precisión en las mediciones.

Hoy es posible manipular átomos o moléculas con sondas microscópicas, ordenar a los 20 aminoácidos básicos que formen nuevas proteínas no existentes en la naturaleza, o ayudar a las moléculas orgánicas a que se agrupen espontáneamente según patrones predeterminados sobre una superficie metálica. No hay duda de que se abre la perspectiva de ofrecer nuevas herramientas a la comunidad técnica. Es curioso que además salgan a la luz las dificultades de emplear los átomos o moléculas individuales como bloques constructivos, dada la multitud de fuerzas físicas capaces de desplazarlos. De hecho, algunas de las críticas más incisivas contra Drexler provienen de los científicos y técnicos que trabajan en el dominio nanométrico.

El que muchos estetas de la ciencia y la técnica tomen las visiones fantásticas de Drexler como representación de la nanotecnia obedece a un fenómeno sociológico frecuente. Los periodistas, novelistas de ciencia ficción y futurólogos crean una imagen pública de un campo científico, que contrasta con la realidad del camino laborioso y a menudo errático recorrido por los investigadores en su cotidiano quehacer del laboratorio.

Drexler, el santón de los nanoístas, habló con su habitual tono enfático el pasado noviembre durante

Los que auguran colmar de bienes al mundo a través del manejo individual de átomos y moléculas levantan fuertes críticas de quienes trabajan a escalas de nanómetros



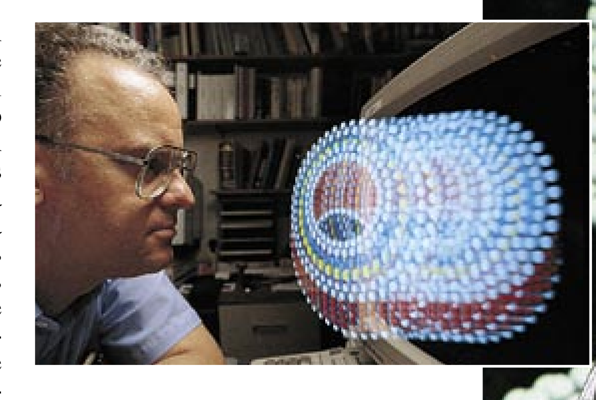
la conferencia bienal que patrocina el Instituto de Prospectiva —institución que él fundó en Palo Alto para allanar los caminos de la nanotecnia—, y se lamentó de la miopía del estamento científico e investigador de los Estados Unidos, que en gran medida ha ignorado esta rama de la nanotecnia. El propio Drexler está familiarizado con proyectos condenados al fracaso. En los años setenta colaboró con Gerard K. O'Neill en idear diversos escenarios para la vida extraterrestre en las colonias espaciales; incluso publicó un trabajo sobre minería en asteroides. Juntamente con otros colegas, Drexler ve en la nanotecnia un medio de rejuvenecer un programa espacial moribundo que no tiene planes inmediatos de crear comunidades de jubilados en Marte. Por el contrario, por esta técnica podrían fabricarse materiales resistentes y ligeros para el transporte en vehículos espaciales.

Las ideas básicas de unas máquinas pequeñas, capaces de autorreproducirse, no son originales de Drexler. Fue el renombrado matemático John von Neumann, padre de la idea de la vida artificial, quien meditó sobre una máquina que pudiera hacer copias de sí misma. Y ya en 1959, en una conferencia muy comentada, el premio Nobel Richard P. Feynman habló sobre la capacidad de construir cosas colocando cada átomo en el lugar deseado. A Feynman le gustaba jugar con la idea de miniaturizarlo todo, llegando a proponer una competición entre las escuelas superiores para ver quién lograba escribir más sobre una cabeza de alfiler. A diferencia del divertido Feynman, Drexler encara su pasión con una seria determinación: la era de la nanotecnia está al caer y tenemos ahora que prepararnos.

No obstante, Drexler puede con todo derecho atribuirse la difusión general de una idea tan tentadora. Siguiendo los pasos de Julio Verne y H. G. Wells, Drexler dibuja en su obra de 1986, *Engines of Creation*, las alteraciones irreversibles que imprime la nueva tecnología en la escena mundial. En ese libro introduce el concepto de "ensamblador", dispositivo robótico de dimensiones no mayores de una décima de micrometro, capaz de recoger una mo-

1. LAS MAQUINAS inmunitarias podrían destruir virus navegando por el torrente sanguíneo, en visión nanotécnica futurista (*izquierda*). En estos robots se alojarían minúsculos engranajes del tamaño de una molécula de proteína. (Los átomos del engranaje se representan por bolas de colores en la ilustración superior.) Mientras, en el laboratorio se forman con átomos los caracteres de "átomo" en japonés (*más a la izquierda*).

lécula reactiva y situarla en una posición tal que interactúe con otra molécula, como si se tratara de una pieza Lego encajada en su sitio. También describe molinos equipados con correas y rodillos para procesar las moléculas. Una batería de nanocomputadores —quizá series de bastoncitos moleculares que cambian de posición para representar distintos estados lógicos— puede difundir instrucciones a billones de ensambladores a la vez. Entre esas órdenes dictadas por los computadores podría figurar la de autocopiarse. En su libro, Drexler describe una sociedad transformada por la nanotecnia, presentando un equilibrio maniqueo de escenarios utópicos y distópicos.



2. K. ERIC DREXLER (*derecha*) y su colega Ralph C. Merkle (*arriba*) imaginan una sociedad transformada por máquinas que construyen objetos grandes y pequeños moviendo, uno a uno, átomos y moléculas. Este sueño ha encandilado a escritores de ciencia-ficción (*portadas de libros*) y a un dentista de California, Edward M. Reifman (*abajo*).

La combinación de nanocomputadores y máquinas moleculares permitiría diseñar sin coste alguno casi cualquier objeto recurriendo a una extensa gama de materias primas, sin excluir el polvo, el aire o la luz solar. Los ensambladores podrían ensartar átomos y moléculas de forma que el diamante u otro material de gran dureza fuese la materia básica de muchos artículos ordinarios, conjugando así ligereza y resistencia.

Sucedería entonces que el coste al peso de los bienes manufacturados por nanotecnia sería comparable al precio de las patatas. Un mundo en el que todos fuésemos ricos por la drástica reducción del coste de las mercancías espantaría a los economistas, científicos de la escasez. Por el precio actual de un automóvil podría comprarse una aeronave gigante. Echando acetona en un sistema de fabricación casero, parecido a un horno de microondas, podría fabricarse en una hora un televisor, un ordenador o un reproductor de disco compacto. También una máquina doméstica podría cultivar rápidamente células procedentes de una vaca para producir un bistec, lo que entusiasmaría a los protectores de animales.

Los diminutos robots sumergibles construidos por ensambladores rejuvenecerían o prolongarían la vida al matar microbios, reparar lesiones de tejidos debidas a afecciones cardiacas o invertir las mutaciones cancerígenas del ADN; las nanomáquinas ayudarían a revivir cuerpos preservados por medios criogénicos restañando el mal causado por la congelación en el cerebro y otros órganos. (Drexler piensa disponer que su cadáver sea congelado.) En *Engines of Creation* se sugiere incluso tomar como base la nanotecnia para la telepatía o para cambios radicales del propio cuerpo.

La otra cara de la moneda es que los ensambladores sirvan para producir rápidamente y en grandes series armas muy destructivas, desde tanques hasta misiles tierra-aire. Y luego está el tenebroso problema, la posibilidad de diseñar nanodispositivos que se autocopien sin control, como las células cancerosas, y reduzcan todo a polvo en cuestión de días.

Estas especulaciones sobre la prolongación de la vida y la catástrofe universal provocaron las carcajadas de numerosos científicos. En 1992 Drexler salió al paso de las críticas con *Nanosystems*, obra en la que pretende dar fundamentos físicos, químicos y biológicos a sus diminutas máquinas. Confiriendo a esta obra un intenso contenido técnico, Drexler defiende el carácter respetable de sus ideas. Pese a todo, el libro no ha pasado de ser una curiosidad para el grueso de la comunidad científica. Muchos no han podido tomar en serio un capítulo en el que se presentan componentes de ensambladores semejantes a dispositivos mecánicos de tamaño natural. Así, una plataforma de seis patas imitaría las utilizadas para inclinar los simuladores de vuelo en diferentes actitudes de cabeceo, balanceo y guiñada, ¡pero con dimensión máxima de 100 nanómetros, el tamaño de un virus! "Esto no es ciencia, es espectáculo", dice Julius Rebek, destacado investigador de la química del autoensamblaje en el MIT.

Aunque apartado del cauce principal de la ciencia y la ingeniería, Drexler sigue arrastrando adeptos, sobre todo entre los informáticos cautivados por la perspectiva de hacer tangible todo lo que puedan especificar en coordenadas tridimensionales. "La nanotecnia reduciría esencialmente a un problema de programación cualquier caso de fabricación, desde construir una vacuna que cure un resfriado común a la fabricación de un buque a partir de los elementos del agua del mar", afirma el físico y escritor de ciencia ficción John G. Cramer.

El "valle del silicio", meca de los aficionados a lo pequeño, alberga un verdadero ejército de "nanoístas". Apple Computer ha ayudado a patrocinar la conferencia del Instituto de Prospectiva, que en el pasado noviembre congregó a 300 personas, el doble que en la reunión anterior de 1993. Entre ellos, Ralph C. Merkle, del Centro de Investigación Xerox en Palo Alto, que ganó un reconocido prestigio en criptografía informática, y ahora se dedica a crear modelos de componentes de máquinas moleculares.

En 1991, John Walker, el esquivo fundador de la compañía californiana de informática Autodesk, donó una suma superior a veinte millones de pesetas para ayudar a iniciar el Instituto de Fabricación Molecular, organismo de investigación. En su mayor parte este dinero ha sufragado proyectos de Drexler como la simulación por ordenador de engra-

najes, rodamientos y otras piezas de proporciones moleculares.

Entre los seguidores de Drexler figuran pensadores como el pionero de la inteligencia artificial Marvin L. Minsky. La nanotecnia también atrae a laboratorios estatales que desean rehacer su imagen. Por ejemplo, el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, uno de cuyos equipos trabaja asiduamente en simular rodamientos y ejes moleculares. La NASA cree asimismo que la nanotecnia permitirá construir naves espaciales más pequeñas y ligeras, y su Centro de Investigación Ames convocó seminarios para examinar cómo podrían obtenerse modelos de nanodispositivos por medio de supercomputadores. Tal vez lo más notable —y lo más peligroso desde el punto de vista de los críticos— sea el interés que despierta entre los estudiantes, que han formado por su cuenta equipos para estudiar nanotecnia en universidades politécnicas como el MIT y el Caltech. En palabras de William A. Goddard III, docente de química y física aplicada en el Caltech, "ha encendido la imaginación de jóvenes y brillantes ingenieros y científicos". Goddard, que se declara admirador de Drexler y Merkle, ha colaborado en algún trabajo ocasional con ellos en la simulación de componentes mecánicos moleculares.

Drexler y sus discípulos consideran la nanotecnia molecular como un imponente reto de la ciencia y la técnica. Afanosamente rastrean cualquier indicio de progreso sobre el que pudiera basarse el anhelado ensamblador que se autocopia. En la conferencia del pasado otoño, Merkle presentó en un gráfico la posible evolución de los trabajos que actualmente realizan químicos y físicos a escalas inferiores a los 100 nanómetros, con las nanomáquinas como meta final. Las líneas de la izquierda del cuadro representaban los experimentos acometidos —sondas que manipulan átomos, tubos de grafito de un nanómetro de diámetro, nuevos tipos de proteínas; las líneas a la derecha correspondían a simulaciones informáticas de piezas de máquinas moleculares para ensambladores. Pero en el centro quedaba un vacío ostensible, claro exponente de lo arduo del empeño.

Una gran mayoría de los investigadores que trasladan su esfuerzo de la simulación al laboratorio no creen que las conquistas de la nanotecnia conduzcan a las metas fijadas por "nanoístas" como Merkle. Aun presumiendo de la etiqueta "nano", varios de ellos se plantean objetivos más modestos.

El profesor de química en Harvard George M. Whitesides presentó un resumen de sus trabajos en la conferencia antes citada. Sus investigaciones se centran en el autoensamblaje de los objetos sencillos y naturales de modo que se reduzcan al mínimo las inestabilidades termodinámicas en las interfases, como la superficie que separa el aire del agua. Whitesides describió cómo sus colegas y él han utilizado moléculas de hidrocarburos autoensambladoras, los llamados alcanetioles, para formar filas ordenadas sobre una superficie de oro. Han demostrado que este método podría ser la base de un proceso para trazar sobre una pastilla de ordenador pistas de circuito más delgadas que las obtenidas por métodos litográficos al uso. En último término, el autoensamblaje de pequeños cubos de silicio que contengan dispositivos capaces de alterar la información podría crear nuevos métodos de fabricación de procesadores para ordenadores.

Whitesides no cree que su trabajo tenga como meta el ensamblador. Distingue entre sus investigaciones sobre monocapas que se autoensamblan y el todavía lejano objetivo de lograr el autoensamblaje siguiendo un juego de instrucciones codificadas. Así como las células biológicas utilizan este último procedimiento para hacer copias de sí mismas, también lo harían los nanoensambladores. "Lo más excitante de la idea de Drexler, la autorreproducción, todavía tiene mucho de ciencia ficción", afirma Whitesides. "Por más vueltas que le demos, no vemos cómo pueda derivarse de lo que ahora conocemos o incluso podamos concebir en un futuro previsible."

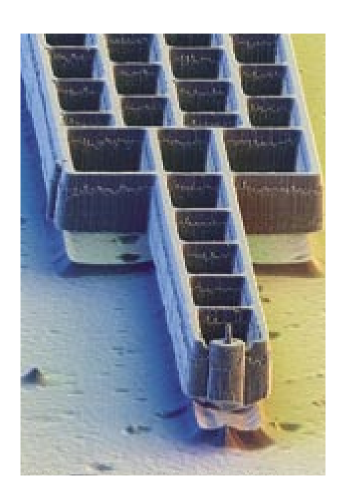
Salvo en unas pocas áreas claramente delimitadas, las espectaculares reducciones de coste imaginadas por los nanoístas pueden quedar anuladas por la complejidad de construir objetos con bloques moleculares individuales. En la fabricación de pastillas de ordenadores, donde los elementos de circuito llegan a medir menos de un micrometro y los costes de una nueva planta se disparan a cientos de miles de millones de pesetas, puede justificarse ese gasto porque la mayor densidad de empaquetamiento de circuitos mejora el rendimiento de la computación y en último término abarata el producto. Para casi todos los demás tipos de bienes, la nanotecnia puede tropezar con un duro competidor: la madre naturaleza. "La concepción de Drexler es sugestiva, pero a veces sus contenidos no son correctos", señala Jane A. Alexander, iniciadora del programa de nanoelectrónica en la Oficina de Proyectos de Investigación Avanzada. "Una vez le oí decir que construiríamos mesas por nanotecnia, y la verdad es que la madera es muy barata y los árboles la fabrican de maravilla."

Mantener cada átomo en su sitio puede resultar también demasiado oneroso si se trabaja uno a uno. David E. H. Jones, investigador del departamento de química de la Universidad de Newcastle upon Tyne, más conocido por "Daedalus", pseudónimo con que firma una columna disparatada de la revista *Nature*, ha criticado aceradamente la idea de que los átomos y moléculas individuales puedan servir de elementos de construcción en el ensamblaje final.

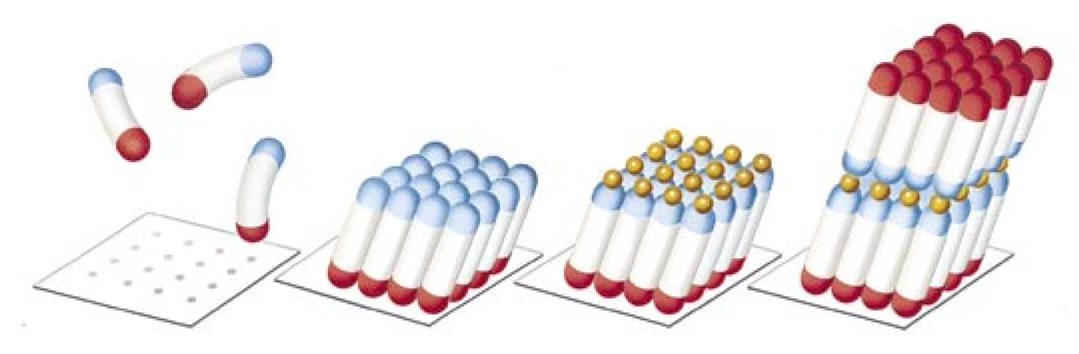
Jones describe los complicados pasos que a veces hay que dar para lograr el control atómico de la materia. En 1989, dos investigadores de IBM trazaron el acrónimo de su compañía manipulando átomos de xenón 35 con un microscopio de barrido por efecto túnel, dispositivo que arrastraba los

Fabricación nanométrica

Aunque las máquinas moleculares de K. Eric Drexler nunca pasen de ser fantasmagorías informatizadas, prosigue la investigación de laboratorio en ciencia de materiales a escalas inferiores a 100 nanómetros. Se describen aquí algunos de los campos nanotécnicos cubiertos.



Microscopio de barrido por sonda. Su diminuta punta muy afilada, como la de un microscopio de efecto túnel, puede desplazar átomos y crear imágenes a escala atómica. Si se logra superar los numerosos obstáculos del desarrollo, esta técnica promete ser adecuada para almacenar bits de información poniendo o quitando átomos de una superficie.



Monocapas autoensambladoras. Una capa de moléculas orgánicas, espaciadas regularmente, se adsorbe a un sustrato, creando una estructura cristalina bidimensional. Diferentes grupos químicos pueden adherirse a las extremidades descubiertas de las moléculas, creando así capas adicionales. Podrían utilizarse para formar rejillas de difracción óptica o en la litografía para fabricar pastillas de ordenadores.

átomos a través de una superficie de níquel. Los átomos se movían obedeciendo a las interacciones de enlaces químicos producidas cuando la punta de tungsteno del microscopio se acercaba a eso de un décimo de nanómetro de cada átomo. Jones señala las dificultades implicadas: el logo de IBM se había creado en un vacío extremado, a la temperatura superenfriada del helio líquido, utilizando átomos inertes de xenón. Fuera de un entorno tan rarificado, el mundo se torna mucho menos estable. "Los átomos individuales de los elementos de estructura más útil son asombrosamente móviles y reactivos a la temperatura ambiente", sostiene Jones. "Se combinan instantáneamente con el aire y el agua de la atmósfera, entre ellos mismos, con el fluido que soporta los ensambladores o con los propios ensambladores."

Jones cree que los nanoístas dejan de considerar cuestiones críticas sobre la termodinámica y el flujo de información en un sistema de ensambladores. "¿Cómo consiguen los ensambladores información sobre dónde está cada átomo, con miras a reconocerlo y capturarlo? ¿Cómo pueden saber dónde están ellos mismos, de forma que puedan navegar desde el depósito de suministro (donde está almacenado el material atómico primario) hasta la posición correcta en la que hay que colocarlo? ¿De dónde sacarán la energía para la trituración en átomos del material, su desplazamiento y, sobre todo, para la masiva computación interna?" La lista no acaba ahí, y Jones concluye: "Hasta que estas preguntas no se formulen correctamente y tengan respuesta, la nanotecnia no tiene por qué tomarse en serio. Seguirá figurando en un extravagante muestrario de predicciones técnicas de ilimitado optimismo."

Para los nanoístas, la obra de Drexler *Nanosystems* da cumplida respuesta a todas estas embestidas. Por ejemplo, el suministro de energía a los ensambladores, una de las dificultades planteadas, podría obtenerse de las ondas acústicas.

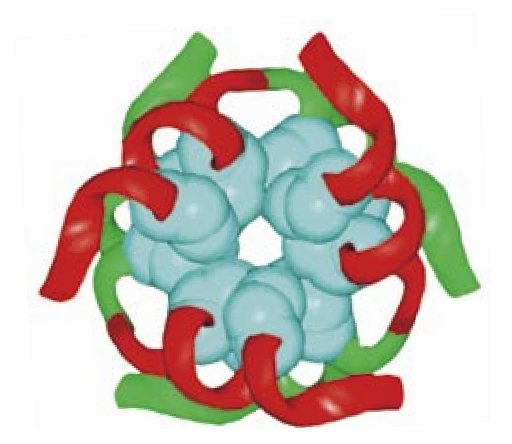
Drexler sostiene que sus detractores están obsesionados por conseguir nuevos productos o lograr subvenciones, y les cuesta mucho mirar hacia un futuro más distante. "La gente de fuera no comprende que estamos hablando del año 2020, y conciben irreales expectativas a corto plazo", afirma. "Esto no gusta a los investigadores, porque no se trata de una nueva medida o unidad, sino de algo que afecta a la ética y al futuro de la raza humana."

A los ingenieros que trabajan sobre la realidad no les basta con leer *Nanosystems*. Desconfían de la etiqueta de "ciencia teórica aplicada" dada por Drexler a su obra —una investigación limitada solamente por las leyes de la física y no por las actuales posibilidades de los laboratorios o las fábricas— y no creen poder compaginar los conceptos de "teórica" y "aplicada". Su respuesta es "vuelva cuando pueda explicarnos cómo hacer estas cosas".

La acumulación de pequeños detalles puede hacer fracasar las mejores teorías sobre micromáquinas. Philip W. Barth, de Hewlett-Packard, tacha de especulación informatizada a las simulaciones de rodamientos moleculares. "En *Nanosystems* hay más agujeros que sustancia", señala; "se dan argumentos plausibles para todo, pero no se responde detalladamente a nada". Barth es un sobresaliente ingeniero en micromecánica, campo en el que se construyen máquinas y sensores microscópicos a partir del silicio. Barth observa que no se analizan una serie de aspectos básicos que podrían imposibilitar la construcción de cualquiera de los nanodispositivos de Drexler. Así, aunque los nanorrodamientos puedan ser molecularmente estables, no se considera la estabilidad de las estructuras sintetizadas durante las etapas intermedias de construcción de dichos rodamientos. Los detalles no resueltos, además, tal vez no sean tan triviales. "La energía es una preocupación fundamental", declara Whitesides. "No vale decir que se saca de las ondas acústicas o de donde sea. Si pudiéramos desentendernos de los detalles del suministro de energía, obtendríamos una máquina de movimiento continuo."



Nanotubos. Pueden fabricarse tubos cilíndricos de grafito, de diámetro un nanómetro y hasta una décima de milímetro de longitud, verdaderos hilos nanoscópicos. Este material presenta una extraordinaria resistencia a la tracción, es buen conductor de la electricidad y podría utilizarse algún día para construir cátodos que iluminen elementos de imagen en la pantalla del ordenador.



Proteínas artificiales. A lo largo de los diez últimos años, varios grupos de investigación y desarrollo han creado nuevos tipos de proteínas a partir de aminoácidos obligados a plegarse en nuevas formas. Este diseño de proteínas, llamado *de novo*, aporta una comprensión más profunda del mecanismo en virtud del cual una cadena lineal de aminoácidos forma moléculas tridimensionales. También podrían así obtenerse proteínas para necesidades farmacéuticas o industriales específicas.

En opinión de Barth, la presente incapacidad de construir un ensamblador, unida a las elaboradas reflexiones sobre lo que puede deparar el futuro, confiere a la nanotecnia un cariz decididamente ideológico, casi religioso.

El legado de los nanoístas puede ser atiborrar a los escritores de ciencia-ficción con ideas para sus relatos. La última moda en este género consiste en tomar la nanotecnia como núcleo central. El mundo que pintan los nanoescritores va más allá del control cibernético de la mente y la carga del contenido del cerebro en un ordenador: postula el control definitivo sobre la materia. "Parece que la nanotecnia se ha convertido en un filtro mágico, merced al cual todo pueda suceder con una explicación pseudocientífica", afirma Istvan Csicsery-Ronay, editor de *Science-Fiction Studies*, publicación de la Universidad DePauw.

En cierta colección de "nano"-historias que apareció el año pasado se recogen las fabulaciones de notables escritores de ciencia-ficción. La obra, titulada *Nanodreams* ("nanosueños"), cuenta con una introducción de Drexler sobre el valor de la ciencia-ficción como medio para explorar las implicaciones sociales de un futuro nanotécnico. Según Drexler, no debe rechazarse una cosa porque parezca fantasía científica, ya que muchas de las ideas descritas en ese género literario se han hecho después realidad. Además, cabe distinguir entre la antigravedad y los vuelos a la Luna, o entre los viajes a través del tiempo y la construcción de un robot para trabajos de fábrica.

Nanodreams narra la historia de un aborto, en el que el dolor sentido por el feto se comunica a nanomáquinas que reproducen esa sensación en el padre del niño, y terminan con la vida del progenitor. En otro capítulo, una compañía ha inventado nanomáquinas capaces de reparar tejidos lesionados por una bala.

Las fantasías nanoístas expuestas en los boletines o en los centros de la World Wide Web a menudo sobrepasan las más atrevidas creaciones de la ciencia-ficción. Pensemos, por ejemplo, en nanorrobots que se encadenan entre sí para crear materiales y objetos del aspecto y la forma que se desee, desde pinturas hasta muebles. Variando levemente la orientación o la posición de los robots se podría pasar de modernas mesas de café a elegantes piezas estilo Luis XV.

La química hunde sus raíces ancestrales en la alquimia, que creía en la transmutación de los materiales como llave de la riqueza y la salud. El movimiento nanoísta se asemeja a una alquimia posmoderna, y por supuesto espera que las piezas de máquina moleculares produzcan dinero contante. Al final de la conferencia del pasado noviembre, se anunció la convocatoria de un nuevo premio, al que se le ha dado el nombre de Feynman.

El premio, dotado con cerca de 30 millones de pesetas, está financiado por Jim von Ehr, directivo de la compañía Macromedia, dedicada a la programación, y Marc Arnold, inversor capitalista de St. Louis. Se concederá a las fundamentales invenciones que van a introducir la era de la nanotecnia molecular: un brazo robótico y un componente de computación para un ensamblador.

Por el momento, los nanoístas sólo pueden esperar a que se logren esas invenciones, y entre tanto siguen formulando sus modelos informatizados de piezas de máquinas moleculares. Puede que la espera sea larga. Drexler mismo confiesa que las críticas han hecho mella en su ánimo y que podría pensar en dedicarse a otra especialidad. "Estoy cansado de todo esto", exclama.

Tan convencidos se hallan los nanoístas de que la esperada invención es inevitable, que evocan una idea expuesta por Feynman el año 1974 ante una clase de graduados en el Caltech. Contó que en una isla del Pacífico los nativos todavía aguardan el regreso de las tropas norteamericanas que aterrizaron allá en la Segunda Guerra Mundial y que volverán para traerles grandes adelantos y riquezas sin límites. Así, día tras día, señalan con hogueras las pistas de aterrizaje, y dentro de una choza, como un prehistórico controlador aéreo, un hombre se ciñe un casco de auriculares de madera de los que brotan cañas de bambú a la manera de antenas. Y así siguen, esperando vigilantes en esa imitación de aeropuerto.

"Hacen todo muy bien," señalaba Feynman. "Guardan perfectamente las formas, y todo parece exactamente igual que lo fuera un día. Pero no da resultado. No aterriza ningún avión." En efecto, como advertía Feynman, hay ciertos esfuerzos científicos que son voluntaristas, aunque incapaces de considerar que algo no pueda funcionar. "Yo comparo este tipo de ciencia con el culto al avión", concluía, "puesto que observa todos los preceptos y guarda las formas de la investigación científica, pero le falla algo esencial porque los aviones no aterrizan". Hasta que los nanoístas no construyan un ensamblador y consigan hacer algo útil con él, la nanotecnia molecular seguirá siendo un modernísimo objeto de culto.

Ciencia y empresa

Sistemas de teleoperación

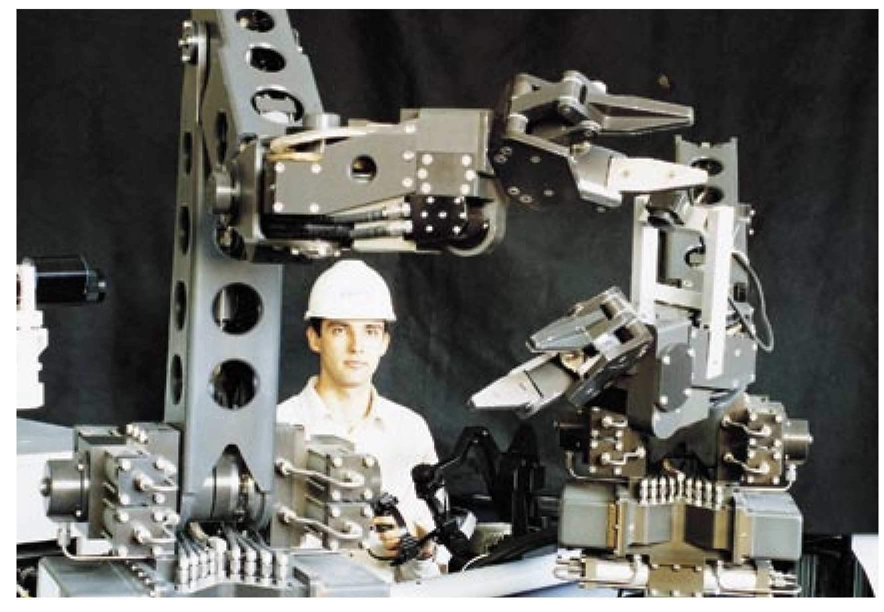
Posibilidades

Un sistema de teleoperación es el que permite a un operario interactuar con un entorno remoto, distinto de aquel en que se encuentra. Frecuentemente, la interacción consiste en la manipulación de objetos. Cuando los manipuladores presentan un aspecto y concepción mecánica similar a los robots, se habla de telerrobótica. Puede también darse teleoperación sin manipulación, como en el caso de vehículos, satélites y otros.

En todo sistema teleoperado existe un entorno o zona local y un entorno remoto. En el primero se encuentra el operador con las interfases necesarias para "sentir" el entorno remoto y actuar sobre él. El segundo, físicamente distinto del primero, es el entorno real sobre el que se pretende actuar; se halla en éste el dispositivo que permite la interacción directa (manipulador, por ejemplo). Con frecuencia, el tipo de mando que utiliza el operador para mover el dispositivo remoto tiene gran semejanza física con éste. Se denomina entonces *maestro* al dispositivo de mando local y *esclavo*, al dispositivo remoto. La comunicación entre la zona local y remota puede realizarse mediante transmisiones mecánicas, hidráulicas, eléctricas, ópticas o electromagnéticas.

Un sistema teleoperado debe incluir, en mayor o menor grado, *telepresencia* y *telemando*. Por la primera se entiende la capacidad que el sistema brinda al operador de percibir lo que está ocurriendo en el entorno remoto. Esta percepción puede realizarse a través de cualquiera de los sentidos. Así, la fuerza ejercida por el manipulador remoto podría ser sentida a escala por el operador. Se llama telemando a la capacidad de manejar el dispositivo esclavo. El dispositivo de mando con el que cuenta el operador adopta diferentes formas: botoneras, palancas ("joystick"), dispositivos articulados de aspecto antropomórfico y otros.

El primer teleoperador se desarrolló ante la necesidad de manipular elementos radiactivos, evitando el riesgo que ello comportaba. Raymond Goertz, del norteamericano Laboratorio Nacional de Argonne, ideó en 1948 un dispositivo mecánico maestro-esclavo. Las fuerzas ejercidas por el esclavo al interactuar con su entorno las "sentía" el maestro, lo que posibilitaba la teleoperación con control bilateral.



Sistema de teleoperación integrado por dos manipuladores con control bilateral. Universidad Politécnica de Madrid

Tras la industria nuclear, las aplicaciones submarinas vieron en los sistemas teleoperados una solución para resolver sus necesidades de manipular objetos a grandes profundidades. Su uso ha resultado eficiente en operaciones de mantenimiento y reparación de plataformas submarinas, así como en la exploración de restos de naufragios. Por su parte, la carrera aereospacial impulsó notoriamente el interés por la investigación sobre la teleoperación. Diferentes centros de investigación, como el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, han desarrollado con éxito diferentes brazos manipuladores y vehículos teleoperados.

También la teleoperación se hace hoy imprescindible en el ámbito de la seguridad ciudadana. Los manipuladores móviles teleoperados se emplean por los servicios de seguridad de muchos países para la desactivación de explosivos o intervención en situaciones peligrosas. Más novedosa es la aplicación, todavía en fase experimental, de la teleoperación a la cirugía. Los sistemas teleoperados pueden ayudar al cirujano en intervenciones que exigen una gran precisión y pulso. Pueden, asimismo, facilitar la atención sanitaria a pacientes en lugares donde sería imposible desplazar al equipo médico especializado.

Las investigaciones actuales en teleoperación se desarrollan fundamentalmente en tres frentes: mejora de la telepresencia, problemas derivados de la comunicación maestro-esclavo y control supervisado. Un sistema con telepresencia precisa de sensores, que perciban la realidad en el lugar remoto, y de una serie de dispositivos, que ofrezcan al operador esta información sensorial de una manera adecuada. La captación de la información en la localización remota no plantea, por lo general, problemas. Imágenes ópticas, fuerzas, presión, sonido u otras magnitudes físico-químicas (temperatura, radiación, composición química) disponen en la actualidad de sensores adecuados para su medición.

La información captada en la zona remota puede ser presentada al operador de diversas maneras. Podría pensarse que esta presentación debería realizarse de la forma más directa. Así por ejemplo, las imágenes captadas por las cámaras remotas deberían ser mostradas al operador a través de cualquiera de los sistemas de visualización tridimensional existentes (pantallas lenticulares, gafas estereoscópicas, holografía u otros). Pero tal solución no resulta siempre la más eficiente. En efecto, puesto que uno de los objetivos de la teleoperación es el de aislar al operador del ambiente hostil de la zona remota, este ambiente no debe estar producido tal cual. La radiación nuclear en una zona contaminada o la presencia de una gas venenoso en una mina son magnitudes que pueden medirse y presentarse mediante sistemas visuales, auditivos o de otro tipo. El desarrollo de las adecuadas interfases, atendiendo a la ergonomía del operador, es un factor clave en los resultados del sistema teleoperado.

La transmisión de las señales entre maestro y esclavo puede ser en ocasiones fuente de problemas. Cuando media entre ambos una distancia apreciable, el tiempo empleado en la comunicación puede ser considerable. Téngase en cuenta que una señal de radio tarda varios minutos en ir desde la Tierra hasta Marte. En estas condiciones, el retraso puede resultar incluso contraproducente para la teleoperación; la acción de mando, tomada por el operador ante una situación determinada del entorno remoto, podría llegar a destiempo originando resultados contrarios a los esperados.

En cuanto al control supervisado, se trata de una solución intermedia entre el sistema autónomo (aún lejos de la realidad) con capacidad de toma de decisiones y el sistema de teleoperación directa. Su incorporación en un sistema teleoperado permite ampliar las posibilidades y prestaciones de éste. Así, ciertas rutinas repetitivas y sistematizadas pueden ser realizadas por el esclavo de manera automática descargando la atención del operador. Del mismo modo, un filtrado inteligente de la información procedente del entorno remoto puede facilitar la asimilación de la misma por parte del operador. Los problemas surgidos del retraso en la comunicación maestro-esclavo pueden soslayarse mediante el control supervisado, que puede incorporar simuladores que permiten probar los resultados de una acción antes de que el sistema esclavo la ejecute.

En el futuro, la mejora de las interfases y la potenciación de la ayuda proporcionada por el ordenador al operador permitirán que la utilización de los sistemas teleoperados se extienda con éxito a otros muchos campos donde la intervención directa del ser humano es difícil o arriesgada por la hostilidad del medio.

ANTONIO BARRIENTOS
DISAM. Depto. de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial
Universidad Politécnica de Madrid

Radiómetros

El detector QED-100

Los radiómetros son instrumentos de medida de la radiación óptica. Sirven para medir la irradiancia incidente sobre ellos en valores energéticos (watts por centímetro cuadrado). La mayoría de los radiómetros necesitan estar calibrados respecto a los llamados radiómetros patrón, en los cuales se mide la energía incidente de forma indirecta, pues ésta se convierte en otro tipo de energía fácilmente medible, generalmente eléctrica.

Hasta hace poco más de una década, todos los radiómetros absolutos o patrón eran de conversión térmica. Se mide en ellos el efecto del calor disipado por los fotones incidentes en una superficie absorbente. Este proceso es complicado y la incertidumbre asociada a la medida, a temperatura ambiente, no es mejor del uno por ciento.

Existen detectores cuánticos. En ellos los fotones incidentes dan lugar a la producción directa de una fotocorriente en un circuito extenso. El ejemplo más común de tales detectores son las células solares. El continuo desarrollo y mejora de esta tecnología ha permitido construir detectores cuánticos con unas características de estabilidad, sensibilidad, linealidad y falta de ruido que los hacen idóneos para instrumentos de medida de la radiación óptica.

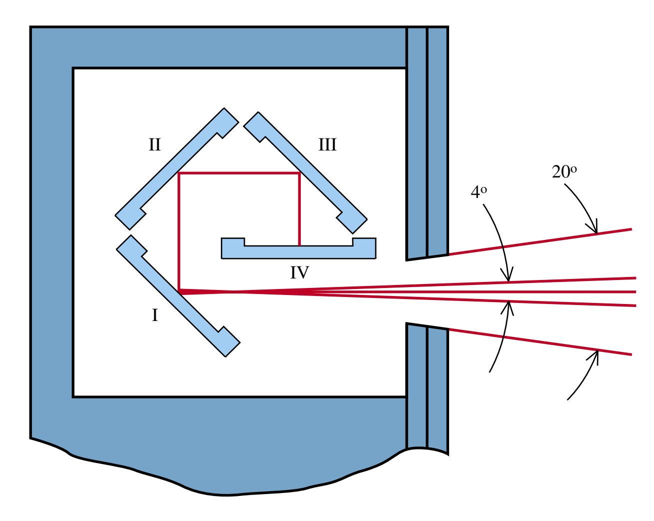
En 1983 Zalewski y Duda, de la Oficina Nacional de Patrones de los Estados Unidos, publicaron en la revista *Applied Optics* un nuevo procedimiento para realizar detectores cuánticos absolutos. Los llamaron "detectores de trampa". La empresa United Detectors Technology los comercializó poco después.

El dispositivo en cuestión, conocido por QED-100, es un detector cuántico de radiación óptica capaz de medir en valores energéticos absolutos, sin necesidad de tomar por referencia a otro detector absoluto. Con la calibración basada únicamente en constantes físicas conocidas, la medida de la radiación óptica se realiza de forma sencilla a partir de la ecuación: $R_\lambda = \lambda/1239{,}5$, donde R_λ es la responsividad del detector en ampères por watts (A/W), y λ es la longitud de onda de la radiación incidente en nanómetros. Se llama responsividad de un detector a la relación entre el valor de la magnitud de salida (respuesta) del detector, generalmente eléctrica; según que esta última sea una intensidad de corriente o un voltaje, la responsividad se expresa en ampères por watt o en volts por watt.

La relación enunciada entre responsividad y longitud de onda es válida a lo largo de toda la región visible del espectro. En la región infrarroja aparecen varios mecanismos de pérdida de precisión que van gradualmente disminuyendo el rendimiento cuántico del detector, mientras que en la región del ultravioleta la eficiencia superará gradualmente el valor calculado, dada la posibilidad de generar más de un electrón por fotón absorbido. Debido a la necesidad de que el rayo incidente esté moderadamente colimado y sea monocromático, las aplicaciones principales del radiómetro se encuentran en la medición de energía de láseres y en su empleo como detector de referencia para otros detectores. La incertidumbre, o imprecisión, asociada a este radiómetro es de una milésima.

En la construcción de QED-100 se utilizan fotodiodos de silicio que, cuando operan con un voltaje pequeño de polarización inversa, tienen un 100 % de eficiencia cuántica a lo largo de toda la región visible del espectro. Esto significa que cada fotón absorbido en el silicio aportará un electrón a la fotocorriente generada en el circuito exterior. Desafortunadamente, mucha de la energía incidente, del orden del 15 al 40 por ciento, según la longitud de onda, se pierde debido a la reflexión en la superficie del silicio, incluso cuando tienen un recubrimiento o capa de óxido antirreflectante.

Para compensar esta pérdida, se ha diseñado un sistema de cuatro foto-



Sección de un radiómetro absoluto de eficiencia cuántica del 100 % con cuatro fotodiodos

diodos, dispuestos de forma tal que la luz incida con un ángulo de 45 grados sobre los tres primeros, y con el cuarto diodo normal a la trayectoria óptica para retrorreflectar el haz de vuelta a lo largo de su trayectoria original. Hay, pues, siete superficies absorbentes en la trayectoria óptica. Los diodos se conectan eléctricamente de manera que su fotocorriente se sume.

¿Cómo opera? El detector incluye un dispositivo electrónico para facilitar la aplicación del voltaje de polarización requerido. El voltaje de polarización inversa necesario para alcanzar la eficiencia cuántica máxima variará con la longitud de onda y la energía del haz incidente. Longitudes de onda más bajas requieren menos voltaje; niveles de energía más altos, más voltaje. En general, voltajes de 6 a 10 volts serán suficientes para la mayoría de las aplicaciones.

Al igual que con los fotodetectores habituales de silicio, el QED-100 es un generador de corriente y se conecta a un amplificador intensidad-voltaje; éste produce un voltaje de salida lineal fácil de medir con un voltímetro de calidad.

A la hora de medir la energía emitida por un láser, la energía del haz puede calcularse fácilmente dividiendo por la responsividad del QED-100 o R_λ. Responsividad R_λ que equivale a λ/1239,5 ampères/watt multiplicado por el rendimiento cuántico. El símbolo λ indica la longitud de onda del láser en nanómetros. Por ejemplo, en un QED típico, la responsividad para la línea del láser de helio-neón de 632,8 nanómetros es 0,510 A/W. Esto es, el 99,9 % de la eficiencia cuántica unidad.

¿Cuál es el rendimiento cuántico del detector? La cantidad máxima de corriente que se puede producir en un fotodiodo de silicio en respuesta a la radiación en el visible y el infrarrojo cercano es de un electrón por fotón incidente. La energía del fotón viene dada por la constante de Planck y la frecuencia de radiación. Dicha frecuencia es, a su vez, la razón entre la velocidad de la luz en el vacío y el producto de la longitud de onda de la radiación por el índice de refracción del aire. Tras unas sencillas operaciones algebraicas se llega a la conclusión de que la respuesta máxima del fotodiodo, es decir, su rendimiento cuántico absoluto, es λ/1239,5.

Si un fotodiodo pudiera diseñarse con pérdidas mínimas del rendimiento de la conversión (fotón-electrón), la responsividad expresada en corriente de salida por flujo de radiación incidente, ampères por watt, se calcularía con un error definido por las pérdidas de conversión, en cuyo caso la incertidumbre en la corrección se transforma en la incertidumbre de la medida absoluta. Las pérdidas de rendimiento cuántico, la conversión de fotones en fotocorriente, pueden ser externas, debido a la reflexión de la radiación en la superficie del silicio, o internas, causadas por la recombinación de portadores (electrones y huecos) antes de la salida al circuito externo.

En el radiómetro QED-100 se utiliza un fotodiodo de silicio llamado de inversión. Tiene éste una pérdida de recombinación despreciable cuando opera con un voltaje de polarización inversa pequeño y la radiación incidente está en el rango visible del espectro. Las pérdidas por reflexión, que podrían afectar hasta casi la mitad de la radiación incidente, se eliminan al situar fotodiodos adicionales en la trayectoria de la luz y combinando la salida de la corriente de todos ellos de forma aditiva.

Los cuatro detectores están dispuestos de tal manera que por retrorreflexión hay siete superficies en la trayectoria de la luz. Si la reflexión inicial de la superficie es del 35 por ciento, la reflexión total será 0,357, con un error, pues, del 0,06 % que podría eliminarse aplicando una corrección. Incluso una superficie con una reflectancia de hasta el 50 % daría lugar a una corrección de sólo 0,78 %.

En resumen, el QED-100 es un radiómetro absoluto ideal para su utilización como radiómetro de referencia en los laboratorios especializados. Su rango espectral es de 400 a 1000 nanómetros y la luz incidente debe ser colimada. Es económico y fácil de utilizar.

ANTONIO CORRÓNS
Instituto de Física Aplicada-CSIC
Madrid

Teledetección aplicada

Islas Canarias

Por su peculiar ubicación, las islas Canarias son escenario de fenómenos de gran importancia medioambiental: capa de inversión térmica, afloramientos y aerosoles, por citar algunos. Sobre ellos, sin embargo, disponíamos de pocos datos. Pero, gracias a la teledetección, vamos adquiriendo un mejor conocimiento y cabe también esperar un mejor aprovechamiento consiguiente de los recursos del archipiélago.

La teledetección aborda la observación exterior de la superficie terrestre y la atmósfera mediante el uso de sensores instalados a bordo de satélites. Ello permite una cobertura global y periódica, incluso de las zonas más inaccesibles, con información multiespectral tanto en las regiones visibles del espectro como en otras bandas del mismo (infrarrojo y microondas). Aunque no es la panacea, constituye una técnica complementaria de otras más tradicionales, con las que compite en costes y mayor rapidez en la obtención de resultados. Su desarrollo ha estado ligado al de la tecnología espacial, desde los primeros satélites de las series *Sputnik*, *Explorer* y otras hasta los actuales *Landsat,* NOAA, ERS o *Meteosat*, entre otros.

El Laboratorio de Comunicaciones y Teledetección (LCT), ubicado en la Facultad de Física de La Universidad de La Laguna, dispone de un equipo para la recepción y procesamiento de los datos en alta resolución que envían los satélites NOAA de órbita polar, entre los que destacan los correspondientes al subsistema AVHRR. Este último es esencialmente un radiómetro multiespectral constituido por un con-

junto de detectores de radiación que posibilitan la observación global, con buena resolución espacial y temporal de la Tierra. Dicho radiómetro permite la medida, en bandas espectrales estrechas del visible e infrarrojo, de la energía emitida o reflejada por las nubes, mares y suelos desde una altura de unos 850 kilómetros, con una resolución espacial de 1,1 kilómetros en las condiciones más favorables.

Los datos digitales procedentes de estos sensores, por su bajo costo, alta calidad y frecuencia de los pases, junto a los avances en la tecnología de computadores, los hacen de aplicación útil en meteorología, oceanografía, climatología, hidrología, ecología y otros campos. En nuestro caso los aplicamos a la medición de la temperatura superficial del mar (SST), aerosoles, índices de vegetación, incendios y dinámica atmosférica.

La determinación con precisión de la temperatura superficial del mar resulta esencial para el estudio de océanos y climas, pues la estructura térmica de su superficie desempeña un papel crítico en la regulación de los intercambios entre atmósfera y océanos. Su conocimiento, imprescindible para verificar los modelos de circulación, exige la medición, desde satélites, de las radiancias procedentes de la superficie terrestre y atmósfera mediante algoritmos multicanales. Para ese propósito se emplean los canales 4 y 5 en el infrarrojo térmico del AVHRR, que junto a los modelos de transferencia radiativa y los perfiles de temperatura y humedad del aire, obtenidos mediante radiosondeo o el subsistema TOVS de los satélites NOAA, permiten desarrollar algoritmos que corrijan la atenuación introducida por los gases atmosféricos, principalmente el vapor de agua.

En una región como la canaria, la medida con precisión de la SST reviste particular interés. En primer lugar, contribuye al estudio de la fauna marina y su posible explotación. Así, el desplazamiento de las masas de agua cerca de la costa noroeste africana, debido a los vientos predominantemente del nordeste y a la componente de Coriolis, provoca la emersión de masas de aguas profundas (afloramientos) que, al arrastrar nutrientes y estar caracterizadas por una menor temperatura, se convierten en medio propicio para los bancos de pesca.

Por otro lado, el color del océano es crítico para determinar su producción primaria, es decir, aquella materia orgánica sintetizada por algas y bacterias. Así, el fitoplancton, formado por las plantas que constituyen el primer eslabón de la cadena alimentaria, cuando crece y se multiplica, sirve de alimento para los peces pequeños, consumidos luego por especies de mayor talla. De ahí el interés de la industria pesquera en la obtención de imágenes de color del océano para localizar las zonas con nutrientes que, en última instancia, son la razón de la aparición de los bancos de pesca.

En lo referente a aerosoles (partículas de polvo, cenizas volcánicas, contaminantes, etcétera), el llegar a conocer su concentración y comportamiento resulta decisivo para entender múltiples procesos físicos y químicos. Por citar algunos: mecánica radiativa del sistema tierra-atmósfera, polución, corrección de imágenes, medida de gases atmósfericos (ozono, óxidos de nitrógeno y otros).

Una de las fuentes principales de aerosoles naturales lo constituyen las partículas de polvo procedentes de las regiones desérticas, que contribuyen con 50-200 millones de toneladas anuales a la existencia de más de la mitad de partículas persistentes menores de 1 micra. Canarias se ve sometida con cierta frecuencia a estos episodios procedentes del Sáhara; por eso, es idónea para el estudio de los parámetros más característicos de los aerosoles, como el espesor óptico o su distribución en tamaño.

La radiación en el infrarojo térmico emitida por la Tierra es absorbida, en parte, por algunos gases atmosféricos como el dióxido de carbono, vapor de agua y ozono principalmente. Esto provoca un aumento gradual de la temperatura, que es una de las consecuencias del efecto invernadero. Sin embargo, en el caso de los aerosoles el efecto global es el opuesto.

El índice de vegetación (NDVI), que es importante como parámetro de referencia de los fenómenos de desertización, se basa en una combinación de bandas espectrales. La fuerte absorción de la radiación visible por la clorofila y la alta reflectividad del infrarrojo próximo por la estructura interna de las hojas son adecuadas para estimar la cantidad de cubierta vegetal de la superficie terrestre y distinguirla de los suelos desnudos, masas de agua y nubes.

Por último, las imágenes obtenidas mediante técnicas de teledetección permiten la detección, seguimiento y evaluación de los incendios, así como la elaboración de mapas de riesgo que contribuyan a su prevención.

Imagen en falso color de la temperatura superficial del mar (SST) en el área de la costa africana, obtenida el 29 de noviembre de 1993 con los datos de infrarrojo (canal 4) del satélite NOAA-12. En esta imagen, corregida geométricamente, se destaca en azul a lo largo de la costa, la temperatura más baja correspondiente a las zonas de afloramiento (masas de agua más profundas que emergen y arrastran los nutrientes, constituyendo un medio propicio para los bancos de pesca)

FÉLIX HERRERA CABELLO
Depto. de Física
Fundamental y Experimental
Universidad de La Laguna

Shawn Carlson

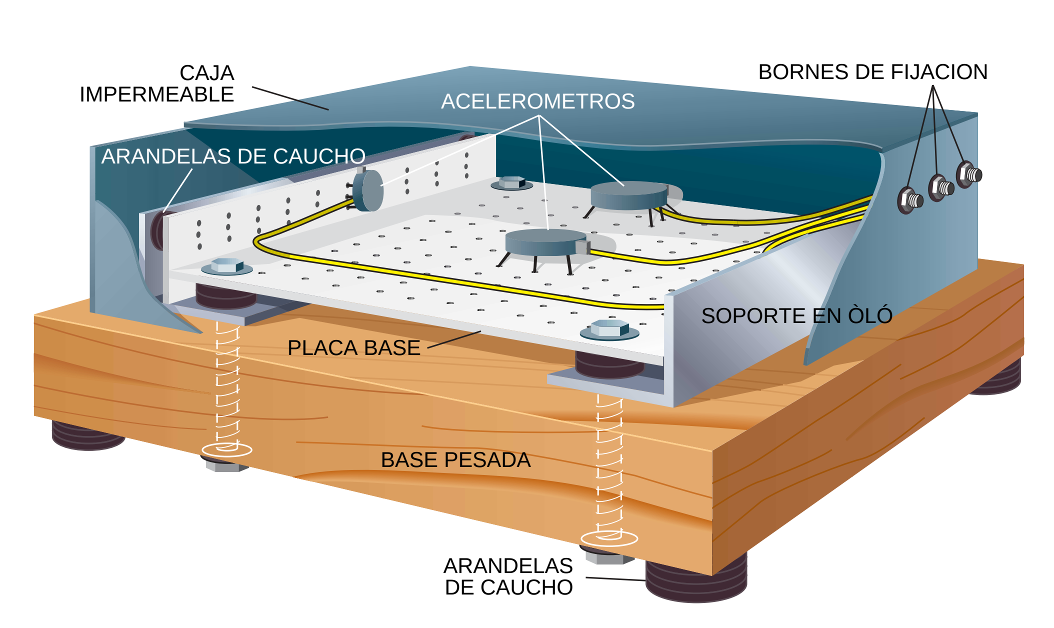
Sismología en el patio trasero

Los terremotos ejercen, desde hace mucho tiempo, una fascinación especial sobre los entusiastas de la ciencia. En el pasado, esta sección de la revista se ocupó en numerosas ocasiones de los sismógrafos. Poco más, dirá el lector, podría añadirse. Pero acaba de ocurrir algo excitante que hace que valga la pena retomar el tema. Empleando una técnica de punta los aficionados pueden ahora, por unas 13.000 pesetas, construir fácilmente unos sismógrafos de buena robustez y que se acercan a la calidad profesional.

El avance consiste en un extraordinario acelerómetro micromecanizado sobre un microcircuito de silicio. Fabricado por Analog Devices en Norwood (Massachusetts), el microcircuito ADXL05 cuesta unas 2500 pesetas y puede detectar unas aceleraciones fantásticamente bajas, inferiores a cinco milésimas de 1 g (g es la aceleración debida a la gravedad terrestre y equivale a un cambio de velocidad de 9,8 metros por segundo cada segundo). Tal sensibilidad basta para detectar temblores pequeñísimos. La aceleración máxima que puede detectar es de 5 g, valor que está precisamente en torno al límite de los mayores terremotos registrados.

Para funcionar como sismógrafo, el microcircuito necesita varias resistencias y condensadores. En la figura 2 se representa el diagrama correspondiente. El diseño ignora deliberadamente la aceleración constante de la gravedad, por lo que no es necesario nivelar el aparato con precisión. Sin embargo, el dispositivo es muy eficaz en la detección de frecuencia de vibración desde 0,1 hertz (una sacudida cada diez segundos) hasta 100 hertz, que constituye el intervalo de cadencias en los que los terremotos liberan la mayoría de su furia.

Por desgracia, el microcircuito ADXL05 puede destruirse por las cargas eléctricas dispersas que se forman en nuestros cuerpos. Es frecuente que tengamos hasta 4000 volts en la punta de los dedos esperando a descargarse oportunamente en cualquier masa. Habitualmente esas descargas estáticas ni las notamos, porque la intensidad de la corriente que producen es bastante baja. Pero esos pequeños pulsos energéticos pueden electrocutar tan delicados microcircuitos. No hay que manejarlos nunca sin que antes nos hayamos descargado. Un buen procedimiento para evitar esos desastres de la electricidad estática consiste en atarse a la muñeca un alambre unido a algo que esté a tierra, el tubo metálico del desagüe del fregadero por ejemplo. Además, si el microcircuito cae sobre una superficie dura se le podrían romper los mecanismos interiores; prepare, pues, una toalla blanda sobre el banco de trabajo cuando construya el circuito.



1. Un sismógrafo con tres microcircuitos acelerométricos ADXL05, montados perpendicularmente entre sí (según los ejes x, y *y* z*), puede detectar el más tenue de los temblores*

Mi sismógrafo dispone de tres microcircuitos ADXL05; dos de ellos miden aceleraciones horizontales y el tercero mide aceleraciones verticales. Instálelos sobre placas base ordinarias teniendo en cuenta que la orejeta apunte en el sentido del eje sensible. Dos de ellos móntelos de modo que las orejetas formen un ángulo de 90 grados, una hacia adelante y la otra hacia la derecha (o sea, abarcando el plano *x*-*y*). Sujete otro trozo de placa base a la placa base anterior, formando con ésta un ángulo recto y colocándola derecha (*véase figura 1*), y luego monte el tercer acelerómetro con su orejeta hacia arriba para que registre las aceleraciones verticales.

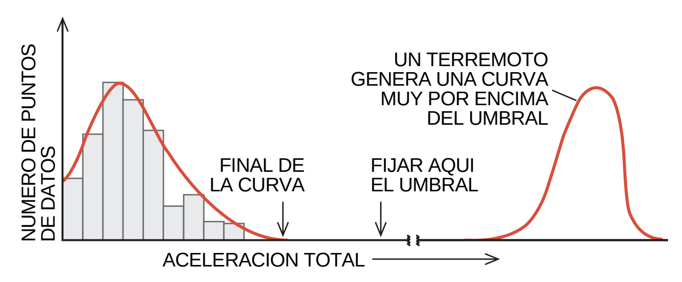
Aloje todo el conjunto en una caja impermeable al agua y oriente el sismógrafo de modo que el eje *y* apunte al norte verdadero (no al magnético) y el eje *x* apunte al este. (En las tiendas de artículos de excursionismo se venden mapas

Cómo identificar el terremoto producido por un camión

Los sismólogos aficionados deben saber discriminar. Para identificar un terremoto procedente de, por ejemplo, un camión estrepitoso, lo primero es registrar lo que nuestro sismógrafo capta en un día normal. El procedimiento se esboza en el siguiente pseudocódigo:

```
INICIO:
LEER DATOS (Vx, Vy, Vz)          Leer las tres tensiones de los
ADXL05
Ax = (VX – 2,5)/0,400            Calcular las aceleraciones medidas
Ay = (Vy – 2,5)/0,400
Az = (Vz – 2,5)/0,400
LONG_A = RAIZ_CUAD(Ax*Ax + Ay*Ay + Az*Az)
                                 Calcular la longitud del vector ace-
                                 leración
GRABAR(ARCHIVO_DATOS,LONG_A,HORA_ACTUAL)
                                 Grabar la longitud y la hora actual
                                 en un archivo de datos
ESPERAR (00:05:00)               Esperar cinco minutos
IR A INICIO                      Repetir
```

Deje que el programa se ejecute sin interrupción durante 24 horas. Luego represente los datos en un histograma. Es decir, represente gráficamente el número de puntos de datos que caen dentro de determinados intervalos de las aceleraciones leídas. Construya al menos ocho de esos intervalos (divida por ocho la diferencia entre las aceleraciones mínima y máxima). Ajuste esos intervalos de modo que el intervalo de aceleraciones con el máximo de puntos de datos contenga al menos 30 de ellos. Conecte los puntos formando una curva (un terremoto real destacaría claramente por encima de esa curva). Busque la aceleración a la cual la curva corta al eje de aceleraciones y multiplique esa aceleración por 1,5. Ese valor revela el umbral. Programe entonces su ordenador de manera que empiece a registrar datos sólo si detecta una aceleración que exceda de ese umbral. Para asegurarse de que lo registra todo, dé instrucciones a la máquina para que recoja datos continuamente durante cuatro minutos.

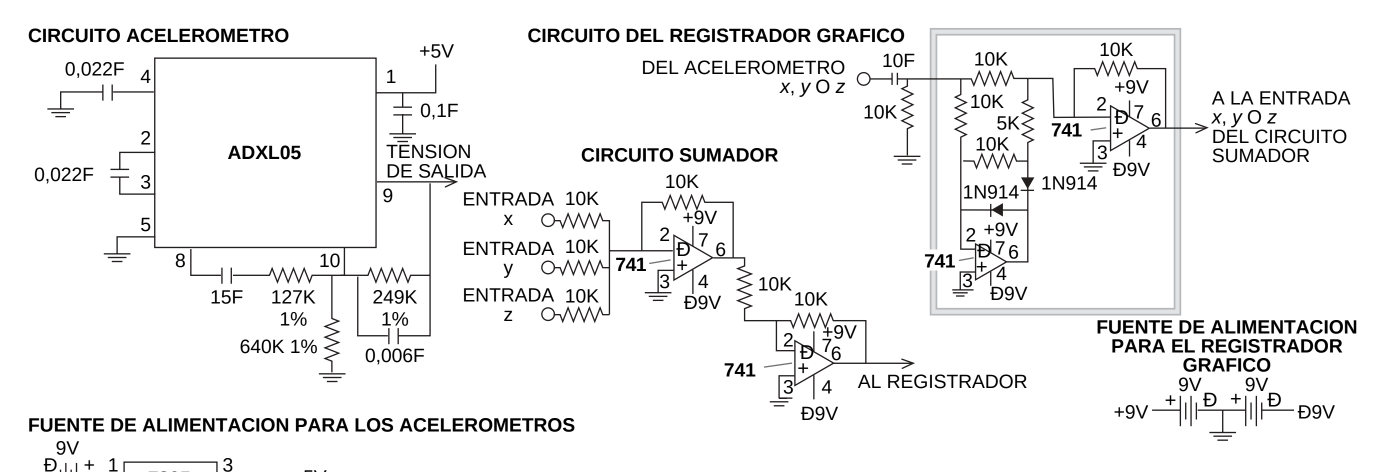


Histograma patrón para ajustar el umbral de aceleración

topográficos que indican la diferencia entre el norte verdadero y el topográfico.) Lo ideal sería atornillar el sismógrafo directamente a un fundamento de hormigón que penetrara al menos un metro suelo adentro. En su defecto, atorníllelo a una base de mucha masa y apóyelo en una superficie (preferiblemente de hormigón) alejada del tránsito peatonal y automovilístico.

En reposo, la salida del microcircuito es de 2,5 volts. Una aceleración de 1 g la hace variar 0,4 volts. En general, la aceleración (*a*) según el eje sensible del microcircuito está dada por $a = (\text{Vsal} - 2{,}5)/0{,}4$, donde Vsal es la tensión de salida y *a* se mide tomando g como unidad.

Hoy en día nuestra herramienta científica más importante suele ser un ordenador personal. Muchas veces una investigación implica convertir medidas (una aceleración, en este caso) en una tensión eléctrica, que podemos digitalizar e introducir en el ordenador. Vernier Software, de Portland (Oregón), fabrica una interfaz muy versátil que enlazará directamente su ordenador a este sismógrafo. Se trata de su tarjeta de tres canales "Multipurpose Lab" (de unas 15.000 pesetas), que se ofre-



2. El circuito de cada ADXL05 necesita resistencias de alta calidad, de valor nominal especificado dentro de 1 por ciento. Un registrador gráfico requiere un circuito adicional para cada microcircuito además de un circuito sumador; ambos emplean amplificadores operacionales 741

ce para sistemas compatibles IBM y MacIntosh. BSOFT Software, de Columbus (Ohio), aporta varias soluciones mecánicas para compatibles IBM por unas 12.000 pesetas, al igual que Prairie Digital en Prairie du Sac (Wisconsin), que asimismo vende una unidad serie para los adictos a MacIntosh.

Finalmente, tenemos a LabView, producido por National Instruments en Austin (Texas). Es éste un programa verdaderamente asombroso que lee los datos procedentes de cualquier interfaz y permitirá a su ordenador imitar a casi cualquier instrumento científico imaginable. La versión para estudiantes puede comprarse a por unas 7000 pesetas en librerías con programas didácticos.

Pero aún necesitará una pizca de magia programadora para evitar que el disco duro se le llene de datos inútiles. Los programas que acompañen a la interfaz de su ordenador deben poder analizar los datos y seleccionar sobre la marcha lo que hay que registrar, por lo que necesitará uno que tome esas decisiones (*véase recuadro*). Trabajar con esta modificación de los paquetes comerciales que se mencionan antes resulta más fácil a unas personas que a otras; asegúrese, pues, de elegir el programa que más se adecue a su destreza en informática.

Si no dispone de ordenador, precisará un registrador gráfico. Ahora bien, los registradores gráficos presentan un pequeño problema. La desviación de la tensión de cada microcircuito puede ser positiva o negativa en función del modo en que el dispositivo va de un valor a otro ("zigzaguea"). Si nos limitamos a sumar sin más las diferentes tensiones, entonces un "zig" horizontal negativo anularía a un "zag" vertical positivo y erróneamente reducirá la estimación de la aceleración real.

Para soslayar este inconveniente, le será necesario combinar las señales en una única tensión que sea una medida correcta de la intensidad total de la vibración. El circuito sumador de la figura 2 realiza ese truco, tomando el valor absoluto de las desviaciones de la tensión y sumándolos.

The Society for Amateur Scientists está organizando una red internacional de estaciones sismológicas de aficionados. Para intervenir en ella o conseguir más información acerca de la sismología de aficionados, póngase en contacto con Society for Amateur Scientists, 4951 D Claremont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

¿Es equitativo el Monopoly?

Todo el mundo ha jugado al Monopoly. Pero pocos, imagino, se habrán parado a pensar en sus aspectos matemáticos. La verdad es que la probabilidad de ganar en Monopoly puede describirse mediante interesantes constructos conocidos por cadenas de Markov. A principios del siglo XX, el matemático ruso Andrey Andreyevich Markov inventó una teoría general de la probabilidad. Pasaré por alto gran parte de su obra. Y no voy a recordar aquí todas las reglas del Monopoly, pero sí trataré de convencer al lector de que se trata de un juego justo. Hemos, primero, de recordar cómo se juega. Los jugadores van lanzando por turnos un par de dados. La suma de puntos de los dados determina cuántos cuadrados puede avanzar el jugador a lo largo del tablero, aunque si un jugador logra un doble —por ejemplo, los "ojos de la serpiente", dos unos— vuelve a lanzar. Todos los jugadores parten de una casilla rotulada SALIDA.

Ciertas puntuaciones, como la 7, salen de forma natural más veces que otras. Hay seis formas de lograr 7 puntos ($1+6$, $2+5$, $3+4$, $4+3$, $5+2$, $6+1$) entre las 36 sumas posibles de puntos del dado. Por tanto, la probabilidad de un 7 es 6/36, o sea, 1/6. Vienen a continuación las sumas 6 y 8, cada una con probabilidad de 5/36; después, las 5 y 9, cuya probabilidad es 1/9. Están después las 4 y 10, con probabilidad de 1/12; las sumas 3 y 11 tienen cada una la probabilidad de 1/18; y por último, 2 y 12 tienen una probabilidad de 1/36. En vista de estos valores sabemos que, en el transcurso de muchas partidas, el primer jugador tiene probabilidad máxima de ir a parar a la séptima casilla, un cuadrado suerte. Si no logra un 7, probablemente caerá en Glorieta Cuatro Caminos o en Avenida Reina Victoria, a uno u otro lado de suerte. Por tanto, el primer jugador tiene una excelente oportunidad de asegurarse una de estas propiedades. Si la adquiere, reduce las posibilidades de que los otros jugadores efectúen una compra en su primer lanzamiento.

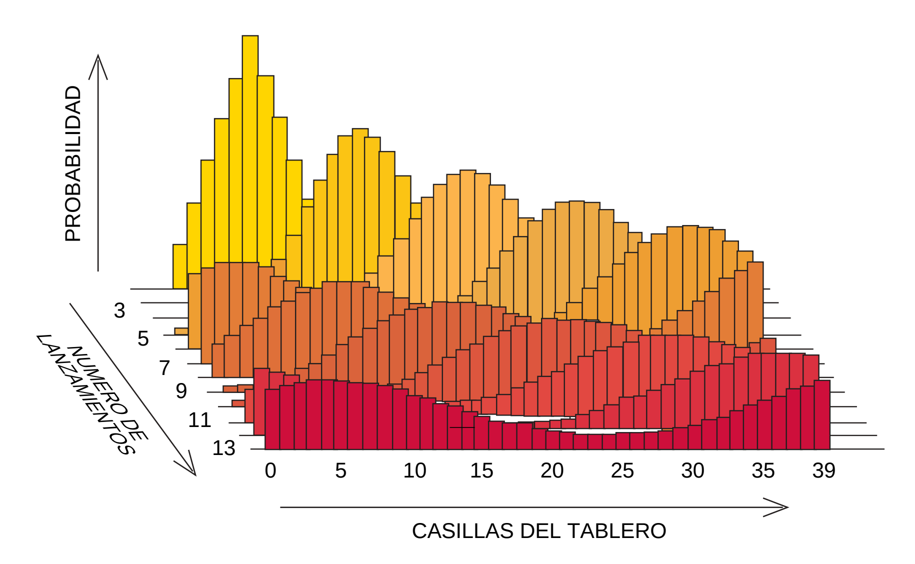
Este hecho constituye, sin duda, una de las razones de que los diseñadores del juego pusieran propiedades baratas cerca de la salida. Los costosos, aunque lucrativos, Paseo de la Castellana y Paseo del Prado se encuentran a varias vueltas de distancia en torno al tablero, momento en que, presumiblemente, las probabilidades se han compensado ya. Pero, ¿es realmente así? Para abordar ese problema introduciré otra simplificación. En lugar de considerar que se lanzan a la vez los dos dados, imaginemos que se tiran uno tras otro. A cada jugador se le permite hacer dos movimientos: uno "fantasma", en el que ignora dónde va a parar, y un movimiento real. Análogamente, adoptará la visión que un matemático tiene del tablero.

Conviene numerar las casillas de 0 a 39. La casilla 40 "se abrocha" con el cuadrado 0, salida, y podemos pensar que los números se cuentan módulo 40, lo que significa que todo número mayor que 39 puede remplazarse por el resto de su división entre 40. Imaginemos ahora a un solo jugador que lanza repetidamente un único dado, y va ejecutando los desplazamientos correspondientes. ¿Qué probabilidad tiene de ir a parar a un cuadro dado tras cierto número de lanzamientos? Sería de esperar que cuando el número de lanzamientos fuera grande, esta probabilidad se aproximase a 1/40, para cualquiera de las 40 casillas. Dicho de otro modo, todas deberían resultar igualmente probables.

La forma de hallar estas probabilidades consiste en ver cómo "fluye" su probabilidad a lo largo del tiempo. Cada distribución puede representarse mediante una secuencia de 40 números, que expresan la probabilidad de aterrizar en cada uno de los cuadrados individualmente. Al principio de la partida, el jugador se encuentra en la casilla cero (salida), con probabilidad 1 (hecho seguro). Por tanto, la distribución de la probabilidad es un 1 seguido por 39 ceros. Tras un único lanzamiento fantasma, la



1. Los matemáticos ven un tablero de Monopoly como un círculo en el que cada bien inmueble conecta con los seis siguientes



2. Distribución de las probabilidades a lo largo de los 40 cuadros. Vemos también cómo varían con cada lanzamiento del dado. La altura de cada barra expresa la probabilidad de ir a parar al cuadrado correspondiente. Los gráficos asociados a los lanzamientos 2 a 13 están apilados de atrás hacia delante

distribución se convierte en 0, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 0, ..., 0; es decir, la probabilidad de ir a parar a uno de los seis primeros cuadrados es 1/6, y ningún otro cuadro está al alcance del jugador.

Fijémonos en que la probabilidad total 1 —inicialmente concentrada en el cuadrado 0— se ha dividido en seis partes iguales y equidistribuida por los cuadrados que se encuentran de una a seis unidades más allá. Este procedimiento es general. Tras cada lanzamiento del dado, la probabilidad de un cuadrado se divide por seis. Estas seis partes iguales fluyen en sentido de las agujas del reloj hacia cada uno de los seis cuadros siguientes. Así, en el lanzamiento siguiente, la probabilidad 1/6 del cuadrado número uno se redistribuye como sigue: 0, 0, 1/36, 1/36, 1/36, 1/36, 1/36, 1/36, 0, ..., 0. Las probabilidades 1/6 de los cuadros segundo a sexto se redistribuyen de forma similar, aunque desplazadas un paso cada vez.

Finalmente, sumamos las probabilidades que se han asignado a cada cuadrado particular. El sexto cuadro, por ejemplo, recibe 1/36 de cada una de las cinco primeras secuencias, pero 0 de la última, por lo que su total es 5/36. El resultado final es 0, 0, 1/36, 2/36, 3/36, 4/36, 5/36, 6/36, 5/36, 4/36, 3/36, 2/36, 1/36, 0, ..., 0. Notemos que esta distribución coincide con nuestras expectativas anteriores correspondientes al lanzamiento de dos dados. Pero ahora podemos continuar. En el tercer lanzamiento (fantasma) hemos de multiplicar cada término de la sucesión por 1/6, y luego desplazarnos uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis términos. A continuación sumamos los números de cada cuadro.

La confección de un programa que vaya calculando una por una estas distribuciones de probabilidad en un ordenador no ofrece dificultad. Vemos los resultados representados en la figura 2, partiendo de la distribución "triangular" obtenida en el segundo lanzamiento. En cada lanzamiento subsiguiente, el gráfico de la probabilidad avanza un paso en la ilustración. Podemos observar que el máximo de la probabilidad se desplaza varios cuadrados hacia la derecha en cada paso. (Para ser exactos, se desplaza 3,5 cuadros, que es la media de los números 1, 2, 3, 4, 5, 6.) Prosiguiendo con la simulación en ordenador, se descubre que la figura triangular inicial acaba alisándose, y que todos los valores son prácticamente iguales. Pero, ¿por qué sigue la simulación esta pauta?

Necesitamos para explicarlo la teoría de Markov, que proporciona un método sistemático de seguir la pista al flujo de probabilidad. Se comienza escribiendo la llamada matriz de tran-

La mágica matriz de Markov

Sea M la matriz de transición. Se calculan ante todo un conjunto de 40 números, los llamados valores propios o autovalores de M. Un número *m* es valor propio de M si es posible escribir 40 números en los 40 vértices de la red, de manera que, al dividir por 6 cada uno de ellos y hacerlos fluir por las seis líneas que salen en sentido horario de ese vértice, los números resultantes son exactamente *m* veces los números iniciales. (La expresión simbólica es mucho más sencilla: $Mv = mv$ para cierto *v*). Pero hay un matiz: los valores propios no tienen por qué ser números reales comprendidos entre 0 y 1: pueden ser números complejos, expresables gracias al número $i = \sqrt{-1}$.

La secuencia formada por estos 40 números recibe el nombre de vector propio o autovector. Lo único que falta por hacer es hallar el autovalor máximo de entre los 40 calculados. Entonces, la distribución de probabilidad se aproximará tanto como se desee al autovector correspondiente, una vez normalizado éste, para que sus componentes sumen 1, como ha de ocurrir en toda genuina distribución de probabilidad. (Este paso significa, sencillamente, que se ha de dividir cada componente por la suma de todas ellas.)

A causa de la simetría de rotación, la determinación de los autovalores y autovectores no presenta gran dificultad. Uno de los autovectores tiene sus 40 componentes, todas iguales a 1/40. ¿Cuál es su valor propio? Supongamos que partimos de esta distribución, escindiendo cada 1/40 en seis partes iguales de 1/240 que repartimos a lo largo de sus seis líneas de sentido horario. Cada vértice recibe exactamente seis aportaciones, una de cada uno de los seis vértices precedentes. Así que al final queda con $6 \times 1/240 = 1/40$. Esto es lo que un autovector ha de hacer, y en este caso el autovalor es 1. No diré a los lectores cuáles son los otros 39 autovalores, cuyas expresiones son hermosas (aunque tal vez sólo para los matemáticos). De hecho, el autovalor de tamaño máximo siguiente tiene un valor absoluto de 0,964. Tendremos, por consiguiente, que 1 es el autovalor, el mayor de todos, y representa efectivamente el estado a largo plazo de la distribución de probabilidad.

sición correspondiente a la primera figura. La matriz, llamémosla M, es una tabla numérica cuadrada que tiene 40 filas y 40 columnas, numeradas cada una de 0 a 39. El elemento situado en la fila r y la columna c es la probabilidad de trasladarse, en un paso, desde el cuadrado r al cuadrado c. Tal valor es 1/6 si $c = r + 1$, $r + 2$, ..., $r + 6$ (módulo 40); valor que será 0 en los restantes casos.

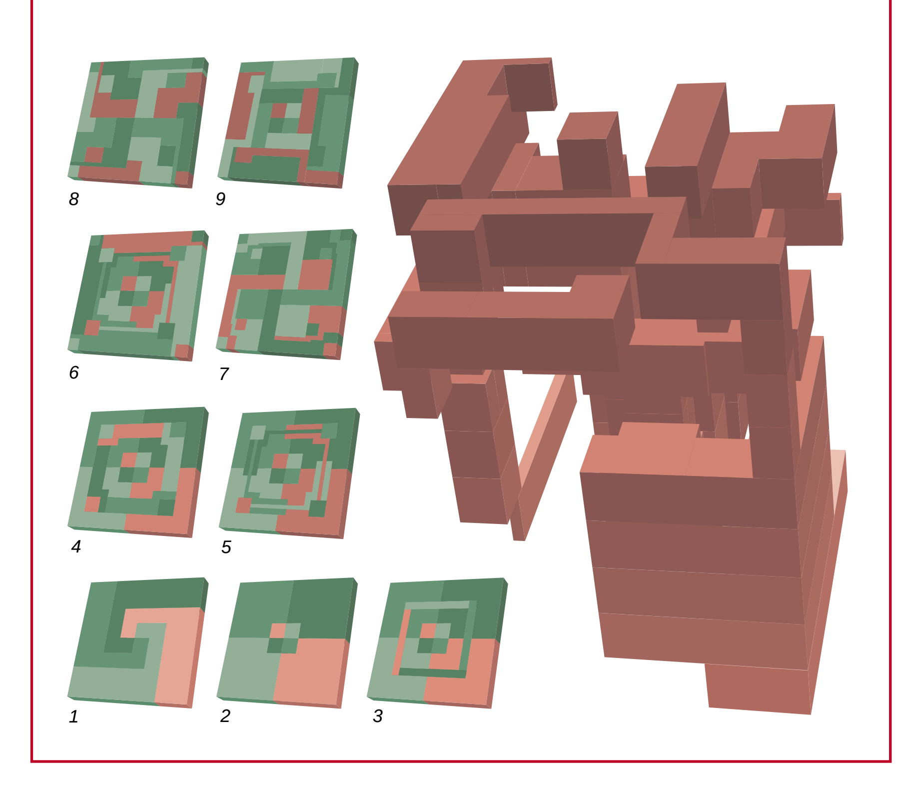
A continuación viene una técnica de cálculo, en la que se utiliza la matriz M [*véase el recuadro*]. El resultado muestra que, tras muchos lanzamientos, la probabilidad tiende realmente a 1/40 para cada cuadrado dado. De esta forma, con una ayudita de Markov, podemos demostrar que un juego tan complicado como el Monopoly es equitativo, en el sentido de que —a la larga— no hay ningún cuadro al que sea más o menos probable ir a parar. El primer jugador, claro está, goza de una ligera ventaja, pero tal bonificación está mitigada por la finitud de su saldo bancario.

Acuse de recibo

Varios lectores me pidieron referencia completa del trabajo de Colin C. Adams sobre teselas anudadas [enero de 1996]. Se titula “Tilings of Space by Knotted Tiles” en *Mathematical Intelligencer*, vol. 17, número 2, páginas 41-51. También recomiendo encarecidamente el libro de Adams, *The Knot Book* (W. H. Freeman, 1994), pero he de advertir que en él no se habla de teselaciones.

Michael Harman, agente de patentes colegiado que vive en Camberley, Inglaterra, me ha enviado una extensa carta explicando diversas formas originales de hallar teselas anudadas. Especial interés tiene la idea de empezar con un nudo tórico, que se forma arrollando un cordel alrededor de un toro macizo (como en el libro *Instantáneas matemáticas*, de Hugo Steinhaus, publicado por la Biblioteca Básica Salvat). Varias copias congruentes de tal cordel pueden recubrir la superficie del toro, y puede extenderse esta “pavimentación” para que rellene el interior, permaneciendo congruentes las teselas.

Es bien sabido que un cubo puede escindirse en dos toros congruentes. Harman señala también que cada cubo puede entonces dividirse en dos nudos congruentes. “Vale la pena anotar”, añade, “que las disecciones de los dos toros pueden ser directamente superponibles, o bien ser simétricas respecto a un plano, como por reflexión en el espejo”.



Libros

Luis Mas, Luis Alonso y Jordi Ocaña

Einstein

Aclarado

El legado de Einstein por Julian Schwinger. Prensa Científica, S. A.; Barcelona, 1995.

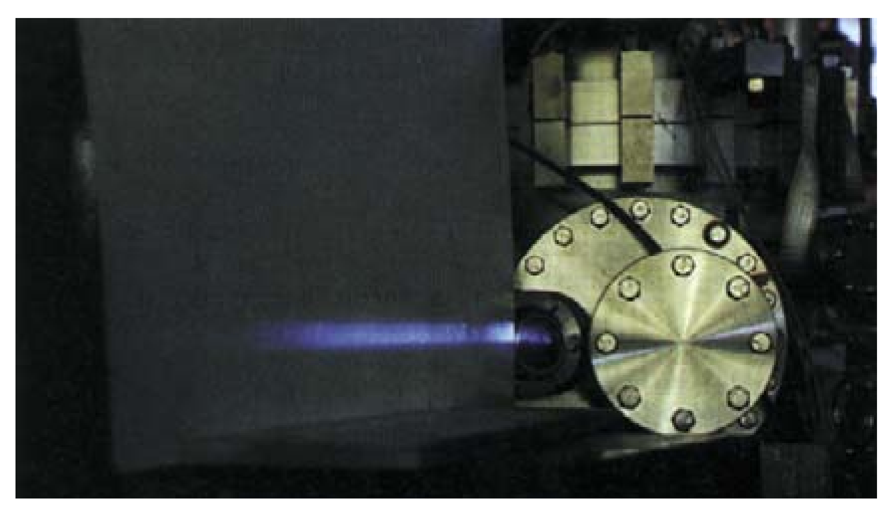
El autor, uno de los introductores de la mecánica cuántica, nos presenta las dos teorías de Einstein de la relatividad: la especial y la general, junto con muchos comentarios físicos de otros campos relacionados. A Schwinger le gustaba dictar conferencias de divulgación e incluso participar en seminarios históricos, es decir, aquellos que pretenden explicar la evolución y confrontación de las ideas sobre el mundo físico a lo largo de los años.

En el caso de la teoría de la relatividad especial es frecuente introducir los conceptos de simultaneidad, contracción de longitudes y dilatación de tiempos. Todo esto lo hace Schwinger de una forma digamos habitual; lo que no es tan habitual y sí muy interesante es explicar en qué circunstancias la teoría es aplicable en nuestros laboratorios con consecuencias diferentes de las de la física clásica.

Encuentro particularmente adecuada su explicación de la radiación de sincrotrón emitida por un electrón acelerado. En este fenómeno interviene la aberración relativista, muy distinta de la clásica, y además aparece el espectro electromagnético en casi toda su extensión, ya que el electrón, a medida que adquiere mayor energía, emite radiación electromagnética que va desde el infrarrojo hasta los rayos X, mostrando así la maravillosa unidad y extensión de dicho espectro. En este punto aprovecha para señalar que nuestras dificultades para entender la relatividad especial son sobre todo humanas: no estamos acostumbrados a las grandes velocidades, cercanas a la velocidad de la luz, que es donde se aplican las fórmulas de la nueva teoría.

Para la relatividad general, teoría gravitatoria más allá de la teoría de Newton, el modelo matemático es mucho más complejo y ello hace que su divulgación resulte más difícil. Schwinger insiste en las ideas físicas subyacentes: principio de equivalencia y necesidad de un espacio-tiempo curvo, y deja sólo como una introducción la presentación del modelo matemático: los espacios-tiempo de Riemann. En este aspecto es curioso el comentario que se hace en el libro al margen de una de sus páginas, cuando trata del tema de la relatividad general: "¡La Dirección General de Salud le advierte que la lectura de los siete párrafos que siguen es peligrosa!" Una vez más es exhaustiva la descripción de las observaciones que dan base física a la teoría. Desde la publicación del libro en inglés hay resultados nuevos que corroboran, con un margen de error cada vez más estrecho, todos los resultados expuestos en el mismo: desviación de la luz en campos gravitatorios con el moderno campo de las lentes gravitatorias, corrimiento hacia el rojo de los espectros y precesión de las órbitas en el problema de dos cuerpos. Este problema de dos cuerpos ya no se limita al estudio del Sol y Mercurio, sino que incluye multitud de trayectorias de estrellas dobles, en especial el caso citado del púlsar binario observado por Hulse-Taylor, cuya precesión de perihelio y reducción de la órbita son ahora, debido a la acumulación de datos, tan manifiestas que se consideran una prueba, indirecta pero fuerte, de la existencia de disipación de energía en forma de ondas gravitatorias; prueba tan clara que Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel. Recuerdo que la teoría de Newton no predice la existencia de ondas gravitatorias.

Las barras detectoras de estas ondas que se describen en el libro siguen existiendo, pero en la rápida evolución moderna de la física están, parece, a punto de ser superadas en eficiencia por los interferómetros que se están construyendo ya en EE.UU. dentro del programa LIGO y a punto de empezar el programa italo-francés VIRGO. También se está proyectando el programa interferométrico espacial LISA. Sobre estos últimos resultados el lector de *Investigación y Ciencia* tiene ya cumplida referencia.


Luz de radiación de sincrotrón

Aparte de las teorías de Einstein, el autor incluye siempre que puede descripciones de otros problemas o resultados físicos, por ejemplo: giroscopios, superconductividad, el primer telégrafo, el positrón, patrones de tiempo, etc. Abundan notas y anécdotas biográficas no sólo de Einstein sino también de Leonardo da Vinci, Maxwell, Faraday, Gibbs, Gauss, etc. Asimismo, abundan las descripciones de muchos aparatos de laboratorio antiguos y modernos.

Julian Schwinger, premio Nobel de 1965, compartido con Feynman y Tomonaga, murió el año 1994. Sus resultados más comentados conciernen a los problemas de renormalización en teoría cuántica de campos. Su afición por la física se inició leyendo libros y en muchas ocasiones si el profesor no le gustaba estudiaba solo en casa, sin asistir a clase. (L. M.)

Matemática

Segmentos

Boece. Institution arithmetique. Texto establecido y traducido por Jean-Yves Guillaumin. Les Belles Lettres; París, 1995. **Theoria mathematica et geometrica medievalia.** Introducción, edición y notas de G. Dell'Anna. Università degli Studi di Lecce; Congedo editore; Galatina, 1992.

Euclides reformatus. La teoria delle proporzioni nella scuola Galileiana, por Enrico Giusti. Bollati Boringhieri; Turín, 1993. **The mathematical career of Pierre de Fermat, 1601-1665**, por Michael Sean Mahoney. Princeton University Press; Princeton, 1995.

Combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae, de Carl Friedrich Gauss. Society for Industrial and Applied Mathematics; Philadelphia, 1995. **Bernhard Riemann**, por Detlef Laugwitz. Birkhäuser; Basilea, 1996.

A diferencia de las ciencias que se ocupan de la realidad extramental, la matemática no ha sufrido en su historia grandes convulsiones. Pero sí ha seguido un curso irregular. A modo de muestra, el sueño platonizante de los fundadores de la *nuova scienza*, la geometrización de la mecánica, ha dejado paso, en los últimos años, a la necesidad de fisicalización de la topología. Esas y otras interrelaciones, que afectan en postrera instancia al estatuto epistemológico de la matemática, tienen también su prehistoria.

Por ejemplo, medieval. Tomemos por iniciador de esa franja de la ciencia a Boecio y su obra de juventud *Institución aritmética*, que Les Belles Lettres acaban de publicar en su colección de clásicos latinos. Anicius Manlius Severinus Boethius nació en Roma hacia el 480, en el seno de la influyente familia de los Anicii, convertida al cristianismo en tiempos de Constantino. El propio Boecio fue cónsul en el 510, como su padre. A la muerte de éste se ocupó de su educación Quintus Aurelius Memmius Symmachus, formado en la cultura griega y resuelto a fomentar su implantación en Roma. Boecio vertió al latín y comentó los tratados lógicos de Porfirio (*Isagogé*) y Aristóteles (*Categorías*). De su talla personal da fe *La consolación de la filosofía*, escrita en prisión y donde reflexiona sobre la inanidad de la gloria y el poder. Ambas enseñanzas, lógicas y morales, prolongaron su influencia hasta el Renacimiento.

No menor fue el peso de sus escritos científicos. Boecio debió mucho a Alejandría, en cuya escuela los alumnos se familiarizaban con la geometría de Euclides, la astronomía de Ptolomeo y la aritmética de Nicómaco de Gerasa. Desde el año 475, por lo menos, Ammonio enseñaba allí, comentada, la *Introducción aritmética* de Nicómaco, curso que nos ha llegado a través de las notas de Asclepio de Tralles y Juan Filopón. Parece verosímil que Boecio tuviera delante los apuntes del curso de Ammonio sobre Nicómaco. La *Institución aritmética* sigue fielmente la *Introducción* del de Gerasa; ésta, epítome a su vez de la matemática pitagórica, se basa en Androcides, Arquitas, Filolao y otros; de Eratóstenes toma su método de "criba". La *Institución aritmética* es la primera piedra puesta por Boecio para levantar su programa de enseñanza de las cuatro ciencias matemáticas que habrían de integrar el cuadrivio.

Para Nicómaco la matemática constituye una escala que permite elevarse hasta el conocimiento de la verdad. Paso previo a la filosofía, es al propio tiempo parte de la filosofía; y así se propone aclarar el pasaje del *Timeo* de Platón relativo a la composición del alma del mundo. Aceptado el principio pitagórico de que el número es el principio de todas las cosas, se impone poseer una teoría del mismo. Todos los números proceden de la Unidad y de la Díada, origen también de lo mismo y de lo otro. Nicómaco procede a través de la definición y de la clasificación por género y especie, avanzando de lo elemental a lo complejo. A partir de la Unidad, y su derivado la Díada, se forman las series numéricas. Se explica también la oposición entre par e impar, con sus múltiples sudvisiones. Distingue luego entre números perfectos (iguales a la suma de sus divisores, como $6 = 1 + 2 + 3$), números abundantes (cuando la suma de sus divisores es mayor, como 12: $1 + 2 + 3 + 4 + 6 = 16$) y deficientes (como 8, al que es inferior la suma de sus divisores: $1 + 2 + 4 = 7$).

Nicómaco acomete las relaciones entre números. Reconoce dos clases superiores, la de igualdad y la de desigualdad. Esta última se subdivide a su vez en cinco subclases, cada una de las cuales va acompañada de su inversa. Una primera relación de desigualdad es el múltiplo, con su oponente el submúltiplo. Nicómaco concede amplio espacio a las proporciones y a las diez "mediedades". En la terna a mayor que b mayor que c, las tres primeras mediedades son la "aritmética": $a - b/b - c = a/a$; la "geométrica": $a - b/b - c = a/b = b/c$; y la "armónica", importante por su vinculación con las leyes de la música: $a - b/b - c = a/c$. Sobre las dos medias proporcionales de la mediedad perfecta se podrán establecer los intervalos de la escala armónica del Alma del mundo. Por el conocimiento del número y sus propiedades accedemos al conocimiento de la organización del mundo. Tal es el núcleo de la enseñanza que Boecio se propone hacer llegar al mundo latino en su *Institución aritmética*.

Queda mucho camino por andar en el conocimiento de la matemática de la baja Edad Media. Se están dando pasos firmes con la recuperación y estudio de los manuscritos. En esa labor trabaja G. Dell'Anna, compilador y presentador de *Theoria mathematica et geometrica medievalia*. Más que de análisis interno de las nociones matemáticas, la investigación de Dell'Anna es de carácter paleográfico y filológico. Una etapa imprescindible, aunque no suficiente. Su introducción abunda en disquisiciones culturalistas sobre el aristotelismo averroísta del primer tercio del siglo XIV, sin acabar de embridar el nivel teórico de los autores, sus fuentes y sus avances. Puede excusarle que la nuez de lo abordado en los manuscritos ahora impresos tienen mucho que ver con la naturaleza y ubicación de los *mathematicalia*.

El manuscrito de Munich CLM 14246 (Em. C 64), fechado en el año 1312 presenta un grupo de obras de lógica, matemática y física comentadas por Egidio Romano y Tomás de Aquino. Incorpora también las treinta *Questiones*, objeto de esta edición reseñada, formadas con textos de Sebastián de Aragón, Hugo de Trapecto, Simón de Padua y Theobaldo de Anchora.

Con buen criterio Dell'Acqua reduce a siete secuencias la treintena de cuestiones. Abarca la primera las cuatro cuestiones iniciales; en ella se enuncian las relaciones entre las entidades matemáticas y las cualidades sensibles, en un contexto aristotélico de los niveles de abstracción, es decir, de desmaterialización. En la segunda secuencia, de la cuestión quinta a la séptima, se plantea el estatuto de las ciencias matemáticas; a saber, si son apodícticas u opinables, teóricas o

prácticas. La tercera, que abraza las cuestiones octava y novena, trata de las relaciones entre objetos propios de cada sentido y objetos que involucran a varios, si no a todos (*sensus communis*). En la cuarta secuencia, que se extiende de la cuestión décima a la décimocuarta, se consideran la estructura de las ciencias matemáticas y las relaciones entre sus disciplinas componentes. Sebastián de Aragón admite dos ciencias matemáticas puras, la aritmética y la geometría, porque todos los aspectos del mundo físico pueden reducirse a espacio y cantidad. Se defenderá la superioridad de la aritmética sobre la geometría porque el número es el fundador del espacio euclídeo.

La quinta secuencia, de la cuestión 15 a la 22, se dedica a la teoría del número y progresiones aritméticas. Allí se sostiene que en el cálculo convergen la acción del sujeto (*anima numerans*) y la estructura del mundo físico (*res numeratae*). El punto tiene una relación espacial, no numérica, con la línea. La geometría y la aritmética son dos mundos distintos, separados por la razón de divisibilidad. En la secuencia sexta, de la cuestión 23 a la 26, se introducen las dimensiones, entendidas dentro de la estructura general del mundo físico. La cantidad material espacialmente indeterminada precede a toda estructura inorgánica u orgánica. Sólo una vez individualizado el sustrato material, con sus determinaciones cualitativas y cuantitativas, podemos hablar de su historia temporal. Por dimensión indeterminada se entiende la línea, superficie o cuerpo indiferente, como la materia ante la forma, en tanto que la determinada es la línea, superficie o cuerpo en su espacio. Hasta aquí los cuestiones de Sebastián con las aportaciones teóricas de Simón y de Hugo. Las cuestiones siguientes, que constituyen la séptima secuencia, centradas en la geometría, son de Theobaldo de Anchora. Estudia el punto y la línea; del primero discute si es algo real o pura ficción y de la línea, limitada por dos puntos, subraya su carácter unidimensional.

Lo mismo que en la baja Edad Media, las universidades del siglo XVI y principios del XVII apenas si enseñaban algo más que los seis primeros libros de los *Elementos* de Euclides, a modo de preparación para adentrarse en las secciones introductorias del *Almagesto* de Ptolomeo. Sólo en las alemanas de las postrimerías del siglo XV aprendían los alumnos álgebra, geometría y trigonometría con cierto rigor. El propio Galileo, habrá de recordarse, no aprendió matemática en la Universidad de Pisa, sino con un tutor privado, Ostilio Ricci.


GVIDIVBALDI
E MARCHIONIBVS
MONTIS
MECHANICORVM
LIBER.

PISAVRI
Apud Hieronymum Concordiam.
M. D. LXXVII.
Cum Licentia Superiorum.

Mechanicorum liber, *de Guidobaldo del Monte, tutor del joven Galileo*

A lo largo de ese período, además, por matemática se entendían conceptos muy distintos según quien hablase. Basta hojear los tratados del XVI para darse cuenta en seguida de la amplia disparidad de opiniones sobre la naturaleza, método y finalidad de la matemática, así como los problemas sujetos a investigación y los criterios de solución de los mismos.

Dos libros resumen bien ese período, *Euclides reformatus. La teoria delle proporzioni nella scuola galileiana*, de Enrico Giusti, y la segunda edición corregida de un clásico reciente: *The mathematical career of Pierre Fermat, 1601-1665*, de Michael Sean Mahoney.

Sin embargo, con todas las matizaciones que se quieran, había corrientes que permiten categorizar ese intervalo. A seis las reduce Mahoney: geómetras clásicos, algebristas cosistas, matemáticos aplicados, cabalistas, artistas y artesanos, y analistas. Los protagonistas del libro de Giusti entran en la primera categoría, la de los geómetras. Fue esta tendencia una creación del humanismo renacentista. Su representante más eximio, Federigo Commandino, tradujo al latín Euclides, Apolonio, Arquímedes, Aristarco, Autólico, Herón, Pappus, Ptolomeo y Sereno. El trabajo de Commandino marcó escuela para otros que participaron en la recuperación de la matemática griega clásica, por ejemplo, Claude Bachet de Meziriac, que tradujo la *Aritmética* de Diofanto de Alejandría, versión que manejó y comentó Fermat.

El proceso de asimilación de los *Elementos* es desigual. Calan antes los libros más sencillos, los dedicados a la aritmética. Por su nivel de abstracción y su arquitectura axiomática ofrece mayor resistencia el libro quinto, donde se introduce la teoría general de las proporciones. Recuerde el lector las tres primeras definiciones: una cantidad es *parte* de una cantidad, la menor de la mayor, cuando aquélla mensura la mayor; y es *múltiplo* la mayor de la menor, cuando aquélla se mide por la menor; una *razón* es la relación que hay entre dos cantidades homogéneas. Se empieza a ver en ese apartado de los *Elementos* la piedra angular del edificio de la geometría, constituida en *mathesis universalis* y herramienta con que debe cortarse la nueva ciencia galileana.

El proceso de apropiación del libro quinto de los *Elementos* se articula en tres fases sucesivas. Una primera de justificación, que transcurre desde

la traducción latina de una versión árabe hasta 1533 cuando se publicó en Basilea la *editio princeps*. El texto de los *Elementos* se acepta en su integridad. Sigue luego un período de sistematización, que se extiende hasta finales del siglo XVI, en el que el acceso directo a códices mejores permite ediciones filológicamente más correctas y matemáticamente más coherentes. Por fin, una tercera fase de reforma del texto euclídeo y de la propuesta de formulaciones alternativas.

En esta tercera fase, de *Euclides reformatus*, la investigación matemática iba estrechamente vinculada a los nuevos métodos de estudio de la naturaleza. Quienes la cultivan forman la "escuela galileana". Unos implicados de manera directa, otros indirecta (Cristoforo Clavio o Guidobaldo del Monte). Guidobaldo del Monte, tutor del joven Galileo, dejó dos manuscritos: un comentario al libro quinto de los *Elementos* y otro sobre la definición euclídea de proporción compuesta. Ninguno de ellos contiene innovaciones de relieve y se limita a aclarar los puntos difíciles. La analogía, término controvertido, es para él semejanza de proporciones.

El primer intento moderno de emprender una reforma orgánica del libro quinto de los *Elementos* se debe a un discípulo de Tartaglia, Giovan Battista Benedetti en su *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*. Para él, la reformulación de la teoría de las proporciones pasa por el restablecimiento del orden natural, que en las demostraciones matemáticas procede de lo simple a lo complejo. Eso implica una inversión de los papeles de las definiciones y teoremas; son estos últimos, o al menos los más sencillos y evidentes entre ellos, los que se tomarán como axiomas. Benedetti reescribe *relación* o *razón* donde Euclides pone *parte*, e interpreta la *suma* de las partes como *composición* de las relaciones.

Cuando Galileo dicta a Evangelista Torricelli la *Giornata Quinta, da aggiungersi al libro delle Nuove Scienze*, había cambiado radicalmente la posición de la teoría de las proporciones. El programa galileano de geometrización de la naturaleza tenía por objetivo sustituir la filosofía natural de cuño aristotélico por un método de investigación fuertemente matematizado. Galileo se dirige a la matemática en busca de respuestas cuantitativas, verificables experimentalmente, a los problemas de la mecánica y del movimiento. Si el lenguaje del universo está escrito con triángulos y círculos, antes de que la mecánica pueda expresarse en él es necesario que sus términos sufran una modificación radical, y allí donde hablaba de peso, movimiento, velocidad, deberá leerse segmento, figura, ángulo. Puente entre el mundo que se quiere estudiar y su representación en términos matemáticos, la teoría de las proporciones ocupa un puesto singular en el método galileano. La situación más elemental es la que compromete a dos variables, en particular cuando están vinculadas entre sí con una relación de proporcionalidad. Ocurre así, por ejemplo, con el teorema 1 del tratado *De motu aequabili*: "En el movimiento uniforme los espacios recorridos son proporcionales a los tiempos".



Jean-Baptiste Fourier (1768-1830)

Galileo y Torricelli propusieron una teoría axiomática fundada en el rechazo de la definición euclídea de cantidades proporcionales. Borelli, por contra, niega que sea posible eliminar una definición operativa de cantidades proporcionales y se apresta a sustituirla con otra que resulte más inmediata. Borelli se sitúa, pues, en una posición crítica con Euclides, pero también con Galileo. A la búsqueda de esa vía intermedia dedica Borelli el libro tercero de su *Euclides restitutus*. Su punto de partida es la definición de razón: "A propósito de dos cantidades hablamos de proporción conmensurable de la primera con la segunda cuando una cantidad antecedente es múltiplo, parte o partes de otra cantidad consecuente." La hipótesis que subyace bajo la teoría borelliana de las proporciones es el *axioma de partición*, es decir, la divisibilidad de cualquier cantidad en un número arbitrario de partes iguales. En Borelli hay un elemento que no está ni en Galileo ni en Torricelli: el axioma de Arquímedes.

Pierre de Fermat se inscribe, entre las tendencias mencionadas más arriba, en la escuela analista. Esta compartía con los geómetras una profunda consideración hacia las fuentes griegas y su deseo de restablecerlas y, con los cosistas (a quienes les interesaba sobre todo la solución de problemas aritméticos, es decir, el *ars rei et census*, el arte de la cosa, de donde su nombre), su compromiso con el álgebra. La figura máxima de esta corriente fue François Viète. Pese a haber muerto cuando Fermat tenía sólo dos años puede decirse que determinó, en una suerte de relación de maestro a discípulo, su estilo, exposición e intereses. A través de sus escritos, Viète le suministró a Fermat el simbolismo algebraico y las herramientas de análisis. Por su naturaleza, el análisis rendía una concatenación de inferencias que conducía de una premisa de valor de verdad desconocido a una conclusión de valor de verdad conocido.

En el tiempo que le dejó libre su profesión jurídica y administrativa, Fermat se dedicó sobre todo a la teoría de números, que sirve de hilván para entender su aproximación a otros campos: geometría analítica, método de máximos y mínimos (del que deriva su método de las tangentes) y cuadratura. Los conceptos de divisibilidad y primaridad del dominio de los enteros forman quizás el tema central de su investigación. Derivan a su vez de la primera gavilla de problemas que Fermat abordó, problemas que implicaban la suma de *divisores propios* (o partes alícuotas) de un número.

Su primer hito en teoría de números consistió en un método general para hallar enteros que sean submúltiplos de las sumas de sus divisores propios. Se trata de determinar si un número es primo y, si no, de hallar sus divisores. La búsqueda general de Fermat de métodos aplicables a este problema general culminaron en el teorema que hoy lleva su nombre: si p es primo y a es cualquier número primo para p, entonces $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$

Se sintió también atraído por las ternas pitagóricas. De nuevo los primos desempeñaron un papel importante, aunque aquí la divisibilidad dejó paso a la descomposición. La descomposición de primos le llevaron a postular una prueba de la conjetura de Diofanto. Arribó a resultados provisionales en la dirección de lo que andando el tiempo pasaría a conver-

tirse, con Gauss, en la teoría de las formas cuadráticas.

Detengámonos, por último, en éste y en su discípulo Bernhard Riemann. Dos libros los han sacado a la palestra: *Theoria combinationis observationum erroribus minimus obnoxiae* ("Teoría de la combinación de observaciones menos sujeta a errores"), de Carl Friedrich Gauss (1777–1855), que G. W. Stewart presenta acompañada de su traducción al inglés, y *Bernhard Riemann 1826–1866*, extensa biografía escrita por Detlef Laugwitz.

En los años veinte del siglo pasado, Gauss abordó la cuestión de los mínimos cuadrados en dos memorias. La primera constaba de dos partes, publicadas por la Regia Sociedad de Göttingen bajo el título común de *Theoria combinationis observationum erroribus minimus obnoxiae*. En la *pars prior* sustituyó el error medio absoluto de Laplace por la raíz cuadrada del error medio, para demostrar a renglón seguido el teorema de la varianza: de todas las combinaciones lineales de mediciones que estiman algo desconocido, la estimación aportada por los mínimos cuadrados es la más exacta. Este teorema no depende de la distribución de los errores, y, a diferencia del resultado de Laplace, no es asintótico. La *pars posterior* de la primera memoria está dominada por consideraciones de cómputo. Entre otras cosas, Gauss aporta diversas fórmulas de la suma de restos. En la segunda memoria, o *Supplementum*, aplica los principios de los mínimos cuadrados a la geodesia.

La *Teoría de la combinación* fue la última palabra de Gauss sobre los mínimos cuadrados. Pero no su primera, asunto éste que despertó un resonado debate sobre la prioridad. Había descubierto el método en las postrimerías del siglo XVIII y lo empleó regularmente desde 1801 en sus cálculos astronómicos. Pero se debe a Legendre la primera publicación relativa al mismo en un apéndice a las *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*, de 1805. Legendre propuso el método de los mínimos cuadrados a través de la combinación de observaciones y derivó las ecuaciones a partir de las cuales podrían calcularse. Sin embargo, no aportó justificación alguna del método, salvo advertir que con él se evitaban los errores extremos mediante la instauración de un equilibrio entre todos los errores.



Bernhard Riemann (1826-1866)

Hacia el final de su tratado sobre *La teoría del movimiento de los cuerpos graves*, de 1809, Gauss ofreció una justificación probabilista del método y lo denominó "mi principio" (*principium nostrum*), lo que motivó que Legendre le escribiera reclamando la prioridad. Gauss mostraba allí que, si los errores son normales, entonces los mínimos cuadrados dan la estimación de máxima probabilidad. Sin embargo, las razones aducidas para admitir la normalidad eran débiles, por lo que el propio Gauss desecharía más tarde ese enfoque. En otros aspectos, el tratamiento resultaba más afortunado. Contiene la primera mención de la eliminación gaussiana (desarrollada en una publicación ulterior), que se empleó para derivar expresiones relativas a la precisión de las estimaciones.

Para Laplace la mejor estimación debía ser la que presentase el mínimo error medio, entendiendo por tal la media del valor absoluto del error. Publicado en 1809 su teorema central del límite, lo aplicó para justificar el principio de los mínimos cuadrados, tarea que prosiguió en *Théorie analytique des probabilités*, de 1812.

Desde sus tiempos de estudiante en Göttingen, Gauss se había habituado a registrar sus descubrimientos en un diario, que se ha conservado. Las anotaciones son breves, obscuras a menudo, pero confirman la verdad de sus reclamaciones de prioridad. En *Calculus probabilitatis contra La Place defensus*, de 1798, defiende el método contra Laplace mediante combinación de las observaciones, en que reduce al mínimo la suma del valor absoluto de los restos. Hace lo propio con respecto a Legendre. De la correspondencia se desprende que Gauss llegó al método de los mínimos cuadradados entre 1794 y 1795. Cierto es que Legendre logró que el método de los mínimos cuadrados recibiera amplia difusión, pero Gauss y Laplace fueron más allá y lo dotaron de una base teórica consonante. Con todo, ni Gauss ni Legendre trabajaban en el vacío. Los astrónomos se venían esforzando en la combinación de observaciones; por su parte, los matemáticos pugnaban por poner orden en el terreno escurridizo de la probabilidad, mucho antes de que Gauss naciera.

Por una jugada del azar, Gauss provocó la aportación fundamental de Riemann a los fundamentos matemáticos de la física relativista. Tras doctorarse éste en Göttingen en 1849, comenzó a preparar el examen de capacitación cuya superación le franqueara la entrada en la carrera docente. Se requerían dos condiciones: presentar una memoria, que él consagró a las series de Fourier donde introdujo la "integral de Riemann", y dictar una conferencia magistral, a elección del tribunal de entre una terna que el candidato proponía. Se había preparado las dos primeras, pero Gauss escogió la tercera: los fundamentos de la geometría. Riemann salió airoso del aprieto, y su lección *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* ("Sobre las hipótesis en que se apoyan los fundamentos de la geometría") se convirtió en referencia clásica de la matemática, en particular de la geometría diferencial, merced a la introducción de espacios *n*-dimensionales. Riemann consideraba que la geometría debía trascender el espacio tridimensional para ocuparse de conjuntos de *n*-uplas ordenadas. Parte de dos nociones "intuitivas"; una es la de un arco de curva que une dos puntos, el origen y el extremo, sobre una superficie; la otra es la idea de "deformación" de una curva o de una superficie.

Pese a agotarse en un solo volumen toda la obra publicada de Riemann, ningún otro libro iba a ejercer tanta influencia. Capítulo obligado de todas las historias de la matemática faltaba, sin embargo, una biografía intelectual de Riemann, que desarrollara con perspectiva el ensayo escrito por su alumno y amigo Richard Dedekind en los años setenta del siglo pasado. Detlef Laugwitz se ha esforzado en *Bernhard Riemann 1826-1866* por recrear el ambiente familiar y académico, su vida dura y enfermiza, y, muy pormenorizadamente, su innovación del análisis y geometría, sus incursiones en física y filosofía, para concluir en un extensa revisión general de su influencia, bajo el mismo epígrafe del subtítulo *Wendepunkte in der Auffassung der Mathematik* ("Puntos de inflexión en la comprensión de la matemática").

Profundamente religioso a lo largo de su vida (una de sus facetas intelectuales menos conocida es la reflexión sobre los fundamentos filosóficos de la teología), Riemann no siguió los pasos de su padre, un pastor protestante, sino que se matriculó en matemáticas en la Universidad de Göttingen. Allí enseñaba Gauss. El curso siguiente, sin embargo, se trasladó a la de Berlín, donde profesaban Carl Gustav Jacob Jacobi, Peter Gustav Lejeune-Dirichlet, su auténtico maestro, y Ferdinand Gotthold Eisenstein.

Aunque lo estableciera Kelvin, se atribuye a Riemann el *principio de Dirichlet*, del que extrajo el teorema sobre parametrización de curvas por funciones racionales. Mientras que Dirichlet sobresalió en teoría de números, Riemann supo abordar todos los campos de la matemática desde la óptica del análisis. Supo también enriquecer éste con savia de aquéllos; la topología, por ejemplo, iluminaba el análisis con la doble periodicidad de las funciones elípticas.

Riemann volvió a Göttingen para defender en 1851 su tesis doctoral, con una memoria sobre teoría de funciones de variable compleja. En ese contexto abordó las superficies de área mínima. Consagró su primer curso como *Privatdozent* a las ecuaciones diferenciales parciales con aplicaciones a la física. A sus cursos de 1855-56, en los que expuso su teoría de las funciones abelianas, asistieron C. A. Bjerknes, Dedekind y Ernst Schering. Al poco desarrolló la teoría de las funciones elípticas desde la intuición de la doble periodicidad. En 1860 hizo una incursión en la física de las ondas sonoras; un año después prosiguió el trabajo de Dirichlet y estudió el movimiento de un líquido sometido a su propia gravedad dentro de una superficie elipsoide. Publicó también sobre series hipergeométricas.

A Gauss, que murió en 1855, le sucedió Dirichlet y a éste Riemann en 1859. Tres años después se casó con Elise Koch. Minada su salud quebradiza por el zarpazo de la tuberculosis, viaja en los últimos años de su vida a Pisa, donde nació su hija y donde trabó estrecha relación con Enrico Betti y Eugenio Beltrami, quienes inspirados por él trabajan en topología y geometría diferencial. Beltrami, en particular, observó que el concepto de Riemann de espacio curvo podía servir de base para una geometría no euclideana, un descubrimiento revolucionario que ni siquiera Riemann había previsto. (L. A.)

Probabilidad

Introducción general

ELEMENTARY PROBABILITY, por David Stirzaker. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

Existen numerosos libros de texto con una orientación similar a la de la obra de David Stirzaker: servir de base para un curso introductorio en teoría de la probabilidad. Es difícil que un nuevo libro cobre especial interés, que justifique el esfuerzo que conlleva su elaboración. Pero estamos ante la excepción. Su originalidad no radica obviamente en los contenidos, sino en el enfoque general y en la forma pedagógica de distribuir el material.

No debemos confundir ésta con las introducciones generales al uso. Recuerda el volumen primero del clásico tratado de Feller, más en el espíritu general de la obra que en detalles concretos. Se basa fundamentalmente en los ejemplos y ejercicios, todos ellos muy bien escogidos. En todo el libro se refleja la convicción de que no se domina bien un tema hasta que no se han resuelto numerosos ejercicios sobre el mismo. En este sentido puede servir de texto básico en un curso introductorio que busque la adquisición de conocimientos sólidos sobre probabilidades, base para el estudio de la inferencia estadística, técnicas de simulación, procesos estocásticos, etcétera.

Cada capítulo se inicia con un repaso de los conceptos principales. A continuación, se presentan varios ejemplos más trabajados y complejos. Estos ejemplos dan lugar, a su vez, al planteamiento de diversas cuestiones o ejercicios que el lector puede resolver. Y se concluye con una sección de problemas propuestos. Los ejemplos y ejercicios, de muy diversa índole, se refieren a desarrollos teóricos posteriores y a la aplicación de conceptos probabilísticos en una amplia diversidad de campos.

El primer capítulo define el concepto de probabilidad y sus propiedades elementales. El segundo introduce la noción de probabilidad condicional y de independencia estocástica, junto con las fórmulas básicas del cálculo de probabilidades, incluido el teorema de Bayes. Como un complemento técnico de cara a la resolución de algunos ejercicios se abordan las relaciones de recurrencia y las ecuaciones en diferencias. El tercer capítulo, de naturaleza técnica, se ocupa de combinatoria y de funciones generatrices. Por razones de claridad reciben particular atención las variables aleatorias discretas y las variables aleatorias continuas. El capítulo cuarto explaya el concepto de variable aleatoria discreta, función de masa de probabilidad y función de distribución, esperanza matemática y principales desigualdades con esperanzas. En el capítulo quinto aparecen los vectores aleatorios y los conceptos de dependencia e independencia estocástica entre variables aleatorias, momentos mixtos y desigualdades importantes de estos momentos. También se introducen tres conceptos de convergencia de sucesiones de variables aleatorias (en distribución, en probabilidad y en media cuadrática). Todo ello para variables discretas. El capítulo siguiente complementa los dos anteriores y describe las funciones generatrices.

Un esquema similar al de los capítulos cuarto y quinto se repite en los capítulos siete y ocho para las variables absolutamente continuas. Entre los ejemplos y temas considerados podríamos citar el de la generación de variables aleatorias mediante el método de inversión de la función de distribución y mediante el método de rechazo, problemas de supervivencia y problemas de control de existencias. El capítulo nono se consagra a las cadenas de Markov. El libro concluye con un apéndice dedicado a la solución de buena parte de los ejercicios propuestos. (J. O.)

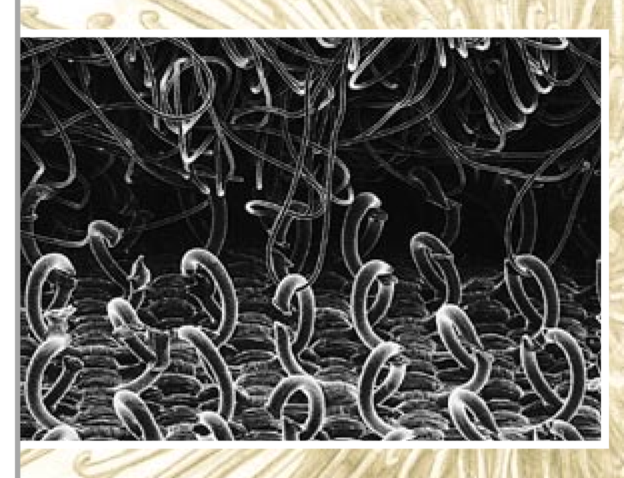
Ideas aplicadas

Martin I. Jacobs

El velcro



GEORGE DE MESTRAL
A este ingeniero suizo debemos la idea de los ganchos y ojales velcro (*fotografía a la derecha, tomada con un microscopio electrónico*) tras examinar un cadillo (figura de fondo) con un microscopio óptico.



La marca registrada VELCRO toma este nombre de la contracción de las dos palabras francesas *velours* (terciopelo) y *crochet* (gancho). Se trata de uno de los pocos diseños humanos deliberadamente construidos a imitación de una estructura natural. George de Mestral tuvo la idea de lo que luego sería el velcro cuando un día, a comienzo de los años cuarenta, se limpiaba de cadillos los pantalones y el pelo de su perro. Un examen al microscopio de aquellas cubiertas espinosas le reveló agrupamientos de minúsculos ganchos capaces de asirse a cualquier cosa semejante a un ojal. Fue así cómo un fruto lleno de pinchos se convirtió en inspirador de los ganchos y ojales que desde los años cincuenta se han venido empleando como sujetadores universales para cualquier cosa, desde pañales hasta blindajes para vehículos para transporte de tropas.

La resistencia que permite conseguir la unión de hileras de ganchos y ojales miniaturas, de alturas entre 0,4 y 2,5 mm, es formidable. Un trozo cuadrado de dos centímetros de lado puede contener casi dos mil ganchos y ojales. Suspendido de una pared puede soportar el peso de una persona de unos ochenta kilogramos. Cuando se tira de ellos oblicuamente, esos ganchos y ojales se separan con un fuerza sorprendentemente menor. Ello se debe a que, el tirar en diagonal, la fuerza actúa sólo sobre una hilera y no sobre la combinación de la totalidad de ganchos y ojales a la vez. Esta pequeña fuerza (de 350 gramos a 1400 gramos para una pieza de velcro de dos centímetros de ancho) basta para desenganchar primero sólo una hilera, luego otra, y así sucesivamente.

TRACCION
Ante una fuerza de tracción perpendicular a la base de los ganchos, la resistencia al desabrochado puede rozar 1,5 kp/cm^2

DESPEGADO
Cuando se tira de ellas en diagonal, cada hilera de ganchos y ojales se suelta con una fuerza más bien reducida. La separación de una hilera tras otra produce el sonido de desgarro característico

CIZALLA
Ante una fuerza aplicada paralelamente a la base de los ganchos, la resistencia al desabrochado puede rebasar los 3,5 kp/cm^2

MARTIN I. JACOBS es director técnico de la Velcro Group Corporation en Manchester (New Hampshire)

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PREPARACION DEL ATLETA OLIMPICO, por Jay T. Kearney

La ciencia y la técnica relacionadas con la preparación deportiva aportan al contendiente olímpico las sutiles ventajas que permiten vencer en la competición internacional.

EL CINTURON DE KUIPER, por Jane X. Luu y David C. Jewitt

Sugerida su existencia por Gerard P. Kuiper en 1951, cuarenta años más tarde se descubrió un primer componente, de escasos miles de kilómetros de diámetro. El elenco alcanza ahora la treintena.

INDICIOS PARA DESCUBRIR EL RIESGO DE CANCER, por Frederica P. Perera

La epidemiología molecular se esfuerza por acotar las primeras señales biológicas que alertan de un riesgo de cáncer. Ahondando en esa línea, la prevención se tornaría más eficaz.

PROGRAMACION DE REDES FIABLES, por Kenneth P. Birman y Robbert van Renesse

Los informáticos están decididos a reforzar las redes y evitar que el fiasco de un programa en un terminal arruine el funcionamiento de todo un sistema de interconexiones.

BASES NEUROBIOLOGICAS DE LA DEPENDENCIA DE LA COCAINA, por Luigi Pulvirenti y George F. Koob

El consumo de cocaína induce alteraciones celulares y bioquímicas en el cerebro que explican los efectos de la droga y los mecanismos por los que el alcaloide produce dependencia.

BUSQUEDA DE LA FELICIDAD, por David G. Myers y Ed Diener

Hasta ahora, el concepto de felicidad quedaba circunscrito al ámbito de la filosofía. La interacción de la sociología y la psicología descubre que ese estado puede tener muy poco que ver con la suerte de cara.

ESTADISTICAS FRACCIONARIAS Y TOPOLOGIA, por J. Gamboa, J. L. Cortés y L. Velázquez

La estadística fraccionaria y las teorías cuánticas topológicas, aunque surgidas desde perspectivas diferentes, son dos campos de investigación dependientes entre sí.

LA TECNICA PERDIDA DE LA BOGA EN LA ANTIGUA GRECIA, por John R. Hale

Las flotas de la Grecia clásica aprovecharon la estrepada al máximo, usando una técnica que los remeros deportivos volvieron a inventar en el siglo XIX.

EL YERMO NUCLEAR DE HANFORD, por Glenn Zorpette

Estados Unidos gasta miles de millones de dólares en la limpieza de los complejos donde se fabricaron sus armas nucleares. En uno de los recintos más contaminados, nadie sabe cuánto costará el proyecto, cuánto durará ni cuán eficaz será.

